



HAL
open science

Les gratte-ciel à la croisée des chemins

Hugues Redo

► **To cite this version:**

Hugues Redo. Les gratte-ciel à la croisée des chemins. Architecture, aménagement de l'espace. 2020. dumas-04278786

HAL Id: dumas-04278786

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04278786>

Submitted on 10 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

LES GRATTE-CIEL À LA CROISÉE DES CHEMINS

MEMOIRE DE MASTER 1
2019 - 2020

Hugues Redo

→ nantes
ensa
→ architecture

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Remerciements

Avant toutes choses, je tiens à remercier plusieurs personnes.

Tout d'abord, mon enseignant encadrant, Monsieur Francis Miguet, pour sa bienveillance, ses conseils quant à la bonne conduite de cet exercice qu'est le mémoire et la liberté et la confiance qu'il a pu me donner tout au long de l'année.

Ensuite, je tiens à remercier du fond du coeur toute ma famille et en particulier ma mère Anne, mon père Jean-Philippe, mes deux soeurs Jeanne et Clémence, ainsi que ma tante et marraine, Laurence. Ils ont toujours su être là pour moi, me couvrant d'amour tout en nourrissant ma curiosité, permettant à mon esprit de s'ouvrir sur le monde.

J'ai également une pensée toute particulière pour ma chérie, Lisa, qui partage ma vie depuis plus de 5 ans et qui m'apporte sans faille son soutien, sa joie et son amour.

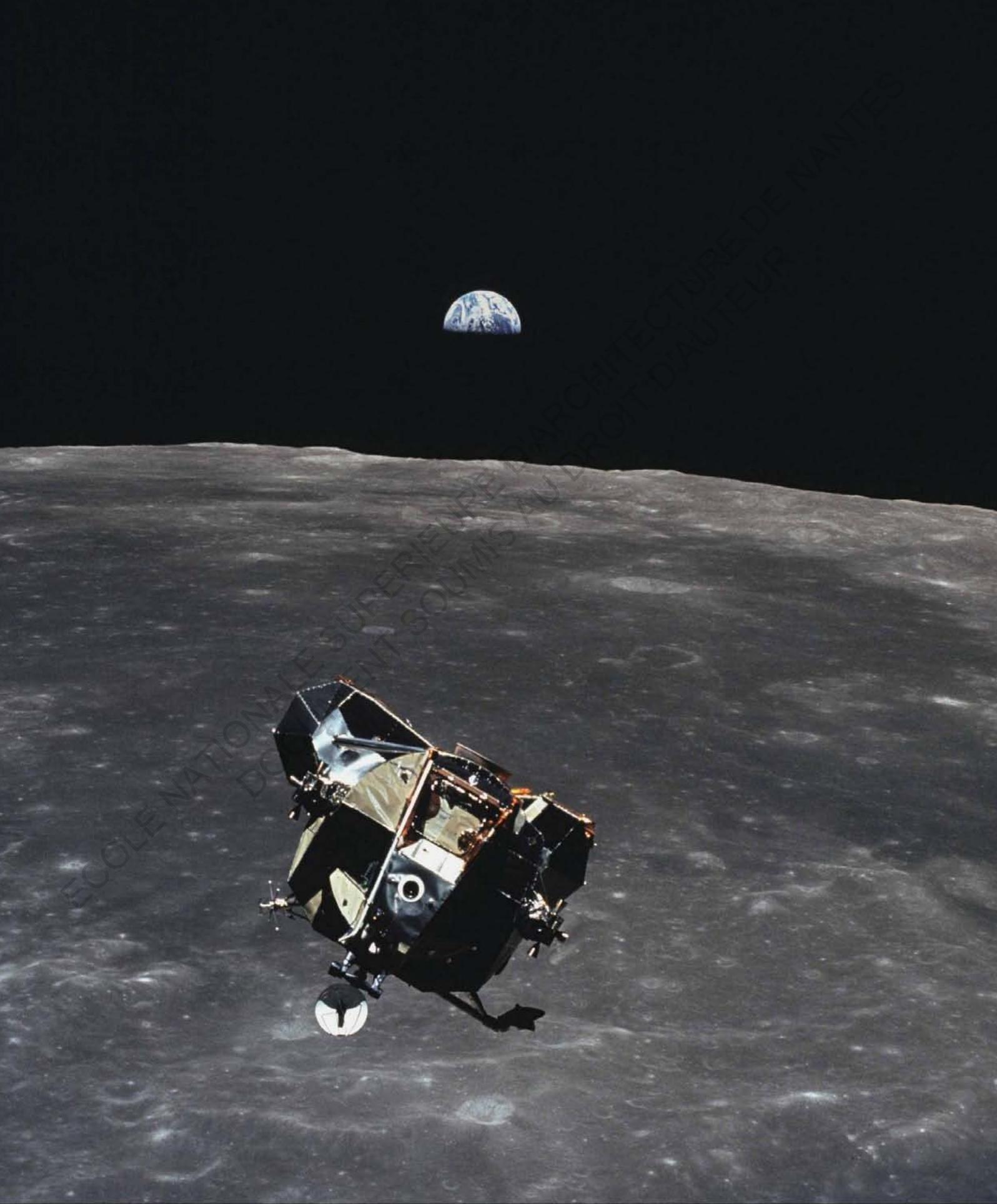
Enfin, je veux remercier mes très chers amis Nantais, ainsi que ma meute Lorientaise, les Ptkms, sans qui je ne serais pas qui je suis aujourd'hui.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Sommaire

| | | |
|---------------|---|------------|
| 0. | Introduction..... | p9 |
| I. | Les origines du gratte-ciel..... | p15 |
| I.1. | L'ère du progrès technique | p16 |
| | De nouveaux matériaux..... | p16 |
| | De nouvelles techniques..... | p18 |
| I.2. | Différents contextes d'apparition..... | p21 |
| | Chicago..... | p22 |
| | New-York..... | p24 |
| | Shanghai..... | p26 |
| | Dubaï..... | p28 |
| | Hong-Kong..... | p30 |
| | Sao-Paulo..... | p32 |
| II. | Les implications d'un tel édifice..... | p35 |
| II.1. | Les forces physiques impactant l'édifice..... | p35 |
| | Les charges gravitaires..... | p36 |
| | Le vent..... | p38 |
| | Les séismes..... | p41 |
| | L'impact latéral..... | p44 |
| | Le contreventement..... | p46 |
| | Le risque incendie..... | p47 |
| | L'évacuation..... | p49 |
| II.2. | L'impact de la tour sur son environnement..... | p52 |
| | L'apport économique et infrastructurel..... | p52 |
| | L'impact physique..... | p55 |
| II.3. | L'impact de la tour au delà de ses environs..... | p58 |
| | Cadrer et préserver les vues..... | p58 |
| | Le rayonnement international..... | p61 |
| III. | La place des tours dans le futur..... | p65 |
| III.1. | Les tours géantes face aux enjeux contemporains..... | p65 |
| | La surpopulation..... | p66 |
| | Le climat et l'énergie..... | p68 |
| III.2. | Les gratte-ciel en mutation..... | p71 |
| | Labels et normes..... | p71 |
| | L'énergie dans les grandes tours..... | p72 |
| III.3. | La conception bio-climatique : le salut des grandes constructions ?..... | p80 |
| | La relation au climat..... | p80 |
| | Double peau et façade intelligente..... | p82 |
| | La ventilation naturelle..... | p83 |
| | La flore verticale..... | p84 |
| IV. | Conclusion..... | p87 |
| | Annexes..... | p91 |

Essayer de prendre du recul et se donner le vertige :
Tous les êtres humains ayant jamais vécu, à l'exception de l'astronaute Michael Collins à qui on doit ce cliché,
sont présents sur cette photographie. (Apollo 11, 1969)



0. Introduction

/ Gratte-ciel / : nom masculin, invariable, calque de l'anglais «sky-scaper» :

«Bâtiment d'habitation ou de bureaux à grand nombre d'étages et à faible emprise au sol par rapport à sa hauteur. On dit en langue administrative IGH [Immeuble de Grande Hauteur]. Le gratte-ciel est une création de l'architecture américaine, et spécialement de l'école de Chicago, à la fin du XIXe s.»

Quelle appellation plus percutante que «Gratte-ciel» aurait-on pu donner à ces grandes constructions ? Si le dictionnaire Larousse nous livre ici une définition normée et bien entendue de ce type d'édifice, on voit bien que les termes restent vague et sujet à interprétation. Un «grand nombre d'étages», oui, mais combien ? Il faut se rappeler des premiers «skyscraper» de Chicago dans la seconde partie du XIX siècle, comme le Home Insurance Building de 1885, qui ne possédait «que»10 étages au dessus de son rez-de-chaussée et pourtant considéré comme le premier des gratte-ciel. Ce premier «skyscraper» est très jeune dans l'histoire de l'Architecture, riche elle, d'au moins deux millénaires ! Comment se fait-il que ces tours ne soit apparues que si récemment ? Quels sont les événements et contextes ayant permit leur apparition il y a seulement 150 ans ? Il s'agira du premier grand questionnement de ce mémoire.

En France, un immeuble est classé IGH lorsque son dernier plancher habitable se situe au dessus des 50m de hauteur, et classé ITGH (Immeuble de Très Grande Hauteur) à plus de 200 mètres. Il existe ensuite d'autres classifications comme les catégories «Supertall» et «Megatall skyscraper» où les hauteurs respectives de ces classes sont 300 et 600m(1). Ces ouvrages vertigineux génèrent, engendrent et subissent quantité de phénomènes physiques et sociaux auxquels nous nous intéresserons dans un second temps.

En fin de compte, le terme gratte-ciel semble assez difficile à définir ! Nous partirons donc de la simple définition suivante : Une grande construction, dans laquelle des usages prennent place. Le terme «grande» doit se comprendre avec notre perception à l'échelle d'être humain, de ces grandes structures. L'échelle humaine est si petite, si insignifiante comparée à une tour de plusieurs centaines de mètres. Comment comprendre un édifice qui nous dépasse tant ? On peut également se poser cette question pour nos territoires de vie, nos pays et finalement notre planète. Comment réussir à prendre conscience des mécanismes naturels, fragiles et insoupçonnés, pourtant bien à l'œuvre à chaque instants ? Seuls les 24 astronautes ayant orbité autour de la Lune ont pu observer la Terre dans sa globalité, et tous ont été marqués par son apparente fragilité. Dans un contexte de bouleversement des écosystèmes naturels et des sociétés humaines, de l'urbanisation massive et du changement climatique, les tours de grande hauteur ont-elle encore une place ? Peut-être peuvent elles avoir un rôle à jouer ? Telles seront les dernières questions qui animeront ce mémoire.

Nous nous intéresserons donc dans cette étude dédiée aux gratte-ciel, aux conditions d'apparitions de cette typologie de bâtiments et aux éléments impactant de tels édifices. Nous verrons quelle place ces grandes tours occupent dans les quartiers et les villes, au sens propre, tout en réfléchissant au poids symbolique qu'elles peuvent avoir à travers le monde. Enfin nous interrogerons cette typologie architecturale face aux enjeux et aux changements de notre monde. Par le biais de ce thème des gratte-ciel, nous verrons tout un ensemble de différents univers allant de l'histoire à l'économie, en passant par l'énergie, l'environnement et d'autres thèmes variés.

(1) <https://www.ctbuh.org/resource/height>

Aussi loin que nous pouvons remonter sur les traces de l'Histoire, le ciel a toujours suscité notre intérêt, notre imagination, notre désir. C'est dans ce lieu inaccessible, où les oiseaux volent libres, que se produisent des phénomènes spectaculaires donnant naissance aux mythes et légendes, récits, et religions... C'est en effet un dénominateur commun à nombre de religions, en tout cas aux 3 grandes religions méditerranéennes monothéistes : Dieu est dans le ciel. De cette conception, nous pouvons dès lors comprendre la raison de la première grande construction de grande hauteur, mythique, la tour de Babel.



La Tour de Babel vue par Pieter Bruegel l'Ancien au XVIe siècle.

Les hommes d'alors cherchaient-ils à se rapprocher de Dieu, ou se hisser à sa hauteur ?

Ce récit biblique, veut que dans la ville de Babel (dont le nom pourrait provenir de l'akkadien *Bāb-Ilum* : « porte de Dieu »(1)) les hommes, qui parlaient alors une langue unique, décidèrent d'unir leur force dans la construction d'une tour qui irait à la rencontre de la divinité. Furieux de cette audace irrespectueuse, le tout puissant les divisa en leur attribuant des langues différentes. Incapables de se comprendre, les hommes ne purent mener le projet et achever la tour...

(1) https://fr.wikipedia.org/wiki/Tour_de_Babel

Les premières grandes constructions furent bâties par les peuples du croissant fertile, en Mésopotamie. Il s'agit d'édifices appelés Ziggourat, comme celui de la ville d'Ur (voir ci-dessous), l'une des plus vieilles villes du monde datée du 3ème millénaire avant J-C. Il paraît vraisemblable que ces édifices puissent avoir inspiré le mythe de la tour de Babel, tellement ces constructions pouvaient paraître imposantes à leur âge d'or. Ces constructions en accumulation de pierres disposées en terrasses peuvent également faire penser aux grandes pyramides de l'Égypte antique.

Le ziggourat d'Ur, sur lequel trônait jadis un temple dédié au Dieu-Lune



Ces édifices, construits il y a 4500 ans à Gizeh, sont parmi les constructions les plus imposantes de la planète. La grande pyramide de Khéops, désignée en l'honneur du pharaon qu'elle abritait, culminait jadis à 146.5 mètres, mais c'était sans compter l'érosion qui lui fit perdre près de 10m.

Il est très difficile de concevoir le défi que pouvait représenter la construction de tels ouvrages, leur organisation ou encore leurs conditions de réalisations. C'est bien de là que vient l'expression «chantier pharaonique».



Les pyramides, désirs de mémoire éternelle des souverains

Il faudra attendre plus de 35 siècles (en oubliant le phare d'Alexandrie) pour voir de nouvelles constructions rivaliser de hauteur avec les vieilles pyramides. C'est durant le Moyen-Age, qu'on voit apparaître en Europe les Cathédrales, ces édifices religieux représentant le siège de l'évêque au sein de son diocèse. Ces édifices atteignaient pour les plus hautes les 160m, à l'aide d'une flèche élancée placée en coiffe du clocher. Cependant, des plus grandes, il n'en reste qu'un petit nombre, leurs flèches s'étant écroulées de faiblesse structurelle ou bien frappées par la foudre.



La cathédrale de Lincoln en Angleterre, construite entre la fin du 11^e siècle et la fin 15^e, a perdu sa flèche, qui culminait alors à 160m, lors d'une tempête en 1549.



La Cathédrale de Strasbourg, atteint les 142m

Si les bâtisseurs de l'époque arrivaient à bâtir plus haut qu'auparavant, c'est avant tout grâce à de nouvelles techniques constructives, propre à l'architecture gothique : Les arcs boutants, la voûte en croisée d'ogives, tout en gardant le même matériau utilisé depuis des millénaires, la pierre. Nous verrons bientôt l'importance des avancés dans le domaine de la technique et de la science en générale, dans la construction des gratte-ciel.



Lingquan Mansion, la plus haute pagode du monde, en 2016.

Si les cathédrales et beffrois dominent l'Europe du Moyen-Âge, de l'autre côté de la planète, en Asie, un style de haute construction émerge également. Il s'agit encore d'un édifice religieux, la pagode. Il s'agit de temples, dans lesquels on trouve des reliques, mais qui pouvaient également servir de tour d'observation et de repère dans le paysage, à l'instar des cathédrales d'Europe. Les structures en cercles ou polygones superposés, dont les débords de toiture font saillie en façade, caractérisent le style qu'on trouve dans la région.

On retrouve ces pagodes un peu partout en Asie : en Chine, en Corée et au Japon notamment, où ces grandes structures en bois résistent plutôt bien aux séismes.

C'est en Chine qu'on trouvait la plus grande de ces structures : la Lingquan Mansion une pagode bouddhiste de 16 étages et vieille de plus de 600 ans, qui fut malheureusement détruite suite à un incendie fin 2017. Nous verrons que, comme dans tous milieux confinés (navires, avions), le feu est l'une des menaces principales pour les édifices de grandes dimensions, comme nous l'avons tristement constaté l'année dernière à Paris.

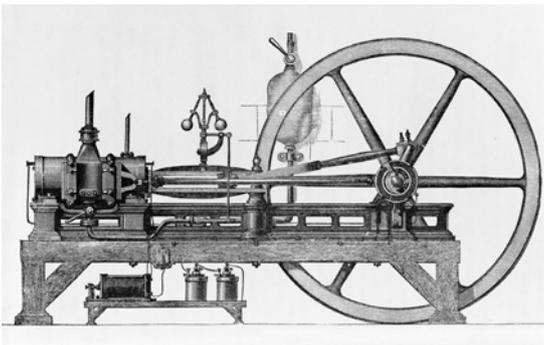




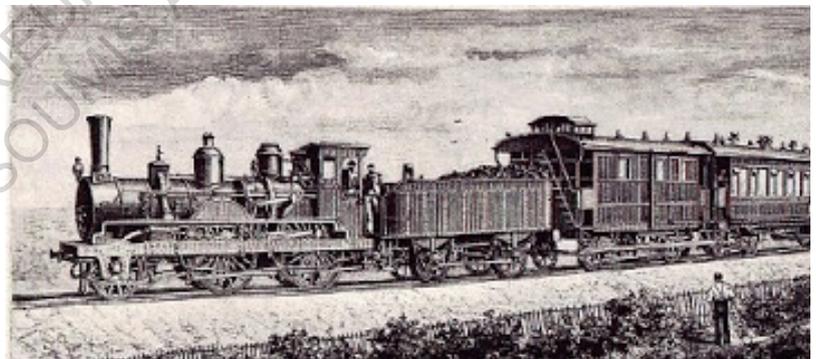
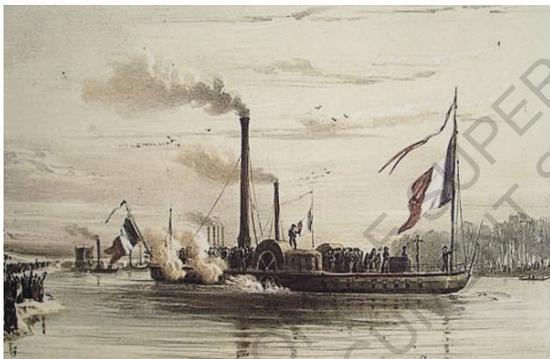
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
DOCUMENT
D'ARCHITECTURE DE NANTES
DROIT D'AUTEUR

I. Les origines du gratte ciel

La tour Eiffel est le symbole d'une époque qui bouleversa notre monde : la révolution industrielle. La découverte de l'électricité, l'invention du télégraphe, du vaccin, de la locomotive... On ne saurait lister la totalité de ces découvertes et inventions du 19^e siècle. C'est surtout l'invention des machines qui changea radicalement les modes de vie. La combustion d'un 1 litre d'essence libère autant d'énergie qu'un homme n'en fournit en 200 jours de travail physique (1). Ainsi, logiquement, les nouvelles machines assurant continuellement un meilleur rendement de travail, elles prirent petit à petit la place des êtres humains dans les champs et les usines. Aujourd'hui, les machines sont présentes partout dans nos vies, si bien qu'un habitant de la planète possède l'équivalent énergétique d'environ 400 «esclaves virtuels»(1).



La profusion et la rapidité des découvertes, comme le moteur 2 temps de Lenoir ci-dessus à gauche (1860), sont alimentées par de l'énergie toujours plus accessible et en profusion, d'abord issue des mines de charbon, puis du gaz puis du pétrole.



La vapeur, grâce à la combustion du charbon, appliquée aux transports maritimes et terrestres permet de lier différents endroits géographiques avec une rapidité inégalée jusqu'alors, avant l'utilisation du pétrole qui donnera par la suite la révolution de l'automobile.

C'est à cette époque, la merveilleuse époque des «découvreurs» comme s'appelait Nikola Tesla lui même, que ces hommes mirent au jour les phénomènes physiques qui sont à la base de nos aptitudes techniques et technologiques actuelles. Sans oublier les grands scientifiques et physiciens comme Newton qui permirent de décrire les phénomènes physiques de la réalité aux travers de modèles mathématiques et d'équations que l'on utilise encore aujourd'hui lors de calculs de structures, comme pour les gratte-ciel. Je pense qu'on peut dire que c'est grâce à ces hommes de sciences, que nous avons le monde tel qu'il est aujourd'hui. Alors, commençons par voir quelles sont les inventions, quels sont les apports de la technique et de la science, qui ont permis l'apparition des tours géantes.

(1) <https://www.youtube.com/watch?v=Vjkq8V5rVy0&t=3097s>

I.1. L'ère du progrès technique

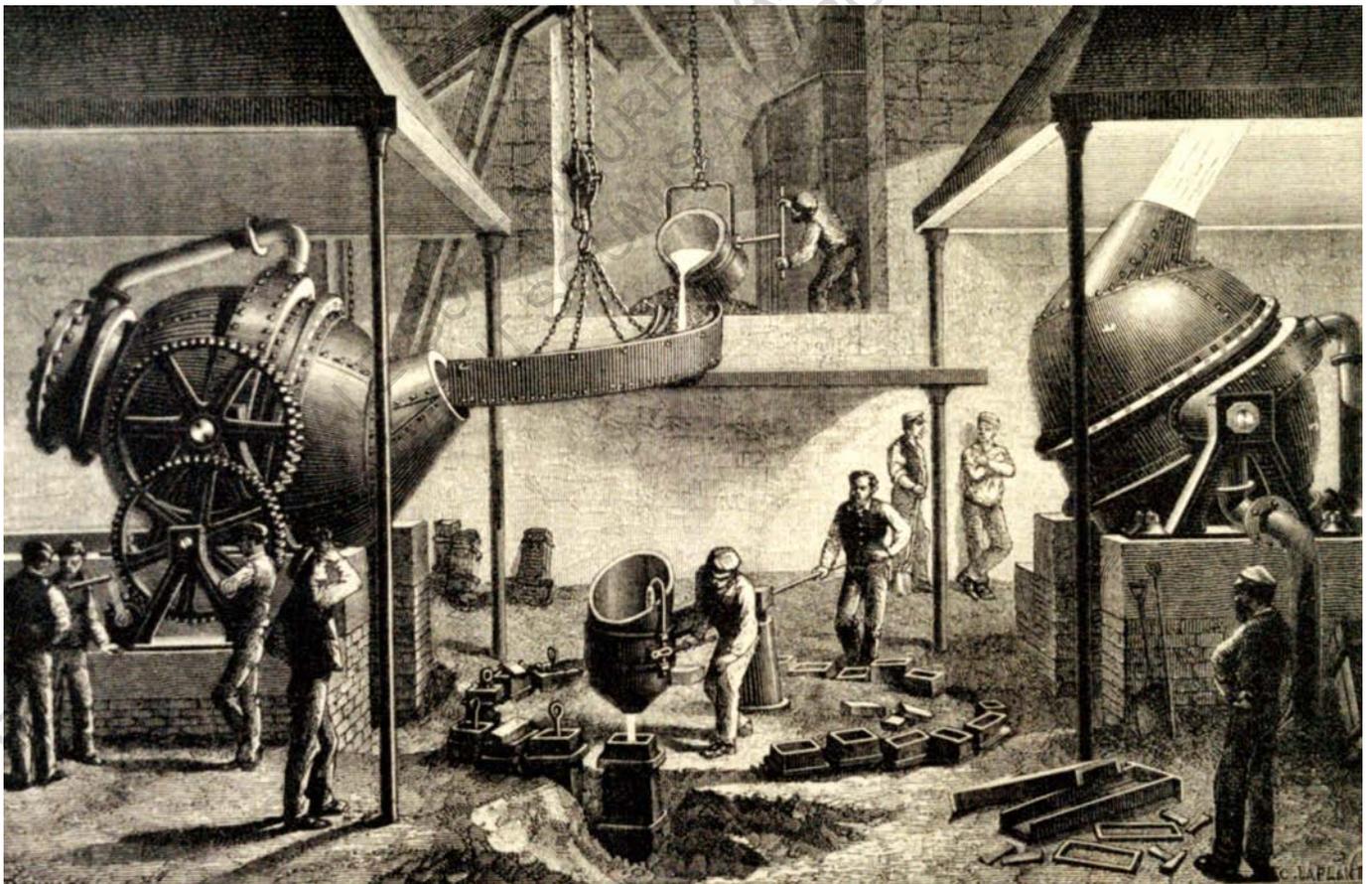
De nouveaux matériaux

Il a fallu une convergence de plusieurs champs de la technique et de l'industrie pour voir émerger ces grandes structures. Nous allons nous demander, si l'on se met à la place d'un bâtisseur de 1850, quels sont les facteurs limitants et quels sont les obstacles à surmonter pour parvenir à gagner la hauteur.

Le premier problème est d'ordre physique, et est relatif au matériau. A l'époque, seule la maçonnerie ou le bois sont disponibles en grande quantité et à prix abordable. Cependant, la pierre est lourde et ses caractéristiques physiques ne permettent pas d'atteindre de grandes hauteurs, si ce n'est au prix de murs porteurs très épais qui compliquent l'apport lumineux à l'intérieur du bâtiment et diminuent la surface rentable de ce dernier.

Cependant, de nouvelles techniques permettent l'apparition de nouveaux matériaux, et ce, de moins en moins cher au fil des années. C'est le cas du procédé Bessemer (1), éponyme de son inventeur, Henry Bessemer. Cet ingénieur sidérurgique, met au point en 1855 un nouveau processus qui permet de se débarrasser des impuretés qu'on trouve dans la fabrication de la fonte à l'époque, pour obtenir un acier : un alliage de fer et de carbone. C'est d'ailleurs la teneur en carbone qui fait la distinction entre la fonte (2 à 6.67%) et l'acier (0.02 à 2%)(2).

De plus, avec l'industrialisation massive, l'acier voit son prix diminuer d'un facteur 2 tous les 10 ans entre 1867 (166\$ pour 1tonne de rail acier) et 1895 (24\$ pour 1tonne de rail acier), ce qui en fait un matériau de choix pour l'application à grande échelle, de manière répétitive dans les grands immeubles.



Procédé Bessemer en 1856

(1) *The skyscraper bioclimatically considered -design premier Academy EditionsKen Yeang 1996*

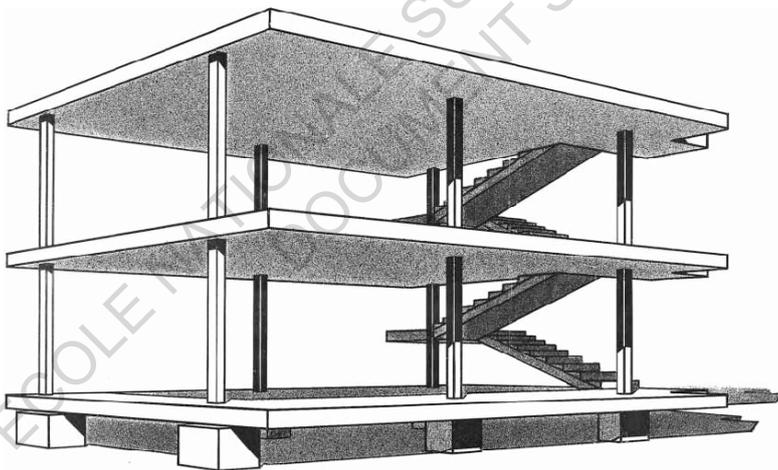
(2) <https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/physique-difference-fer-fonte-acier-6983/>



L'emploi de ce matériau dans la construction des immeubles va présenter de nombreux avantages.

Tout d'abord, l'utilisation de l'acier en tant que structure porteuse permet un changement de paradigme dans la conception même des édifices. On passe de structures pleines, en maçonnerie lourde, à un fin squelette structurel plus léger, qui va libérer l'espace. En effet, il n'y a plus besoin de maintenir une superposition cartésienne des murs de refend puisque qu'ils sont remplacés par le système poteau-poutre en acier, qu'on vient parer d'une enveloppe, d'un remplissage. Par la suite, ce système sera caractérisé comme le «plan libre», la liberté de concevoir sur chaque étage un plan singulier, et sera l'un des 5 principes de l'architecture moderne décrits par Le Corbusier en 1926.

Ci contre, le Wainwright Building en construction en 1891.



La maison Dom-ino, Le Corbusier, 1914.

L'architecte Le Corbusier illustre ici à gauche le principe du plan libre permettant une grande liberté tant sur le plan de l'aménagement intérieur que sur celui de la façade. En effet, le système de poteaux poutres permet de dégager le périmètre du bâtiment et d'y placer de larges ouvertures permettant un éclairage naturel important.

Cette révolution dans la conception pourrait être comparée aux avancées techniques de l'architecture gothique, qui permit elle aussi aux constructions de s'élever plus haut qu'auparavant tout en permettant un apport de lumière très important.

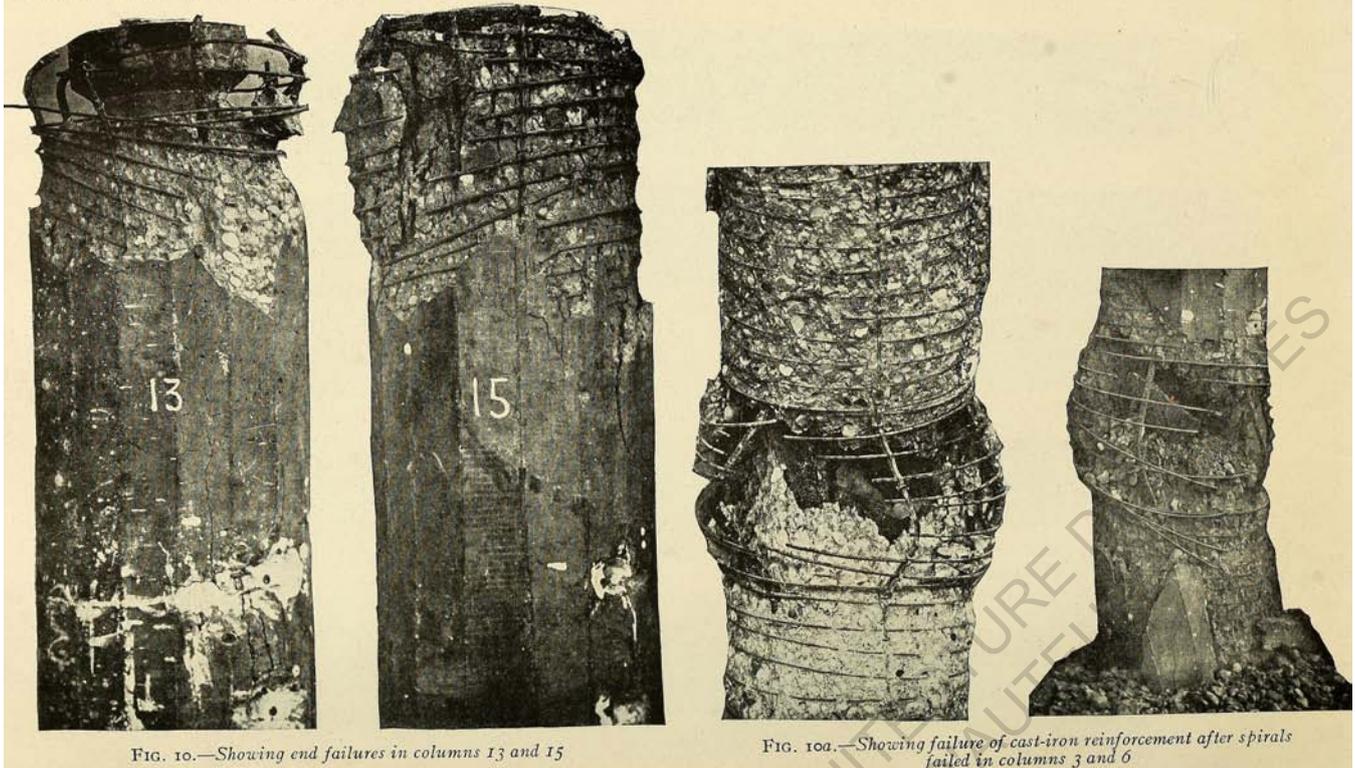
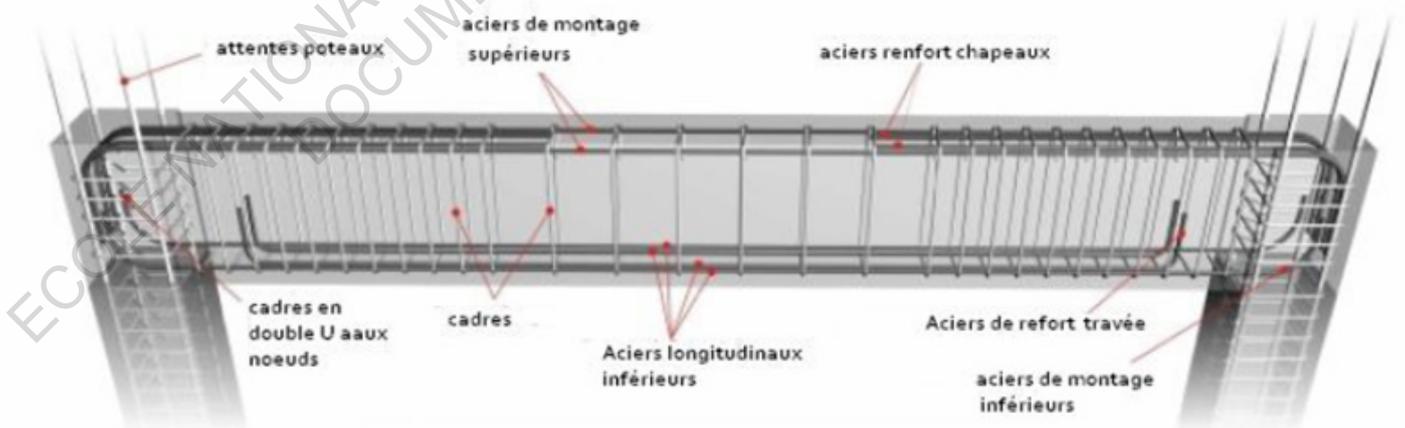


FIG. 10.—Showing end failures in columns 13 and 15

FIG. 10a.—Showing failure of cast-iron reinforcement after spirals failed in columns 3 and 6

Test de résistance à la compression de colonnes en béton armé de fonte au début du siècle dernier

Ensuite, les bâtisseurs de l'époque ont eu la brillante idée d'incorporer ce nouveau matériau, qu'était l'acier, au béton afin de créer un nouveau type de matériau : le béton armé. Le béton est connu des constructeurs depuis l'époque de l'Empire Romain il y a 2000 ans, et a été utilisé au cours des âges comme liant, ou comme structure car il présentait une grande résistance mécanique en terme de compression. Ce matériau connu sa plus grande évolution dans les années 1870-1880 quand certains entrepreneurs comme les américains William E. Ward, Ernest L. Ransome ou le Français François Coignet, eurent l'idée de coupler ces deux matériaux. Se faisant, ils permettaient d'obtenir à la fois un matériau résistant aux contraintes de compression (le rôle du béton) mais également à celles de traction et de flexion (le rôle de l'acier). Si on fait la somme des sections d'acier occupant une section de colonne en béton armé, le ratio est globalement de 2 à 8% de la surface de cette section (1).



Placement des aciers dans une poutre en béton armé

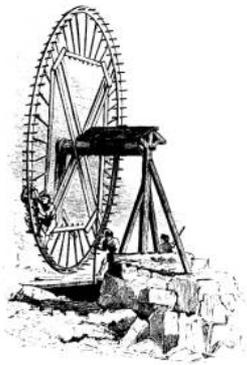
(1) The skyscraper bioclimatically considered -design premier Academy EditionsKen Yeang 1996

De nouvelles techniques

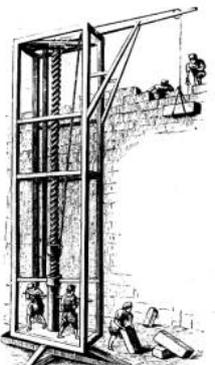
Le second problème est d'ordre pratique. L'un des facteurs limitant la construction des hauts bâtiments est l'accessibilité difficile des étages. En effet, au delà de 4 étages, il devient peu commode pour une personne d'atteindre un niveau sans être essoufflé, sans compter les difficultés logistiques et matérielles relatives aux besoins des bureaux. Il fallait alors inventer un moyen de déplacement vertical efficace.



L'ascenseur du monastère Sainte-Catherine.



Un des premiers treuils : roue à aubes humaine.



Monte-charge à vis pour aider les ouvriers.



Monte-charge à contrepois «homme assis».

Depuis l'antiquité, des plateformes de levage étaient utilisées pour acheminer des matériaux lors de la construction d'édifices. Jusqu'à la révolution industrielle l'énergie utilisée pour élever les plateformes était le plus souvent humaine ou animale.

Avec le développement des mines de minerais, notamment de charbon, les monte charges connurent de nombreuses améliorations et les premiers d'entre eux à disposer d'un moteur furent utilisés dans des mines de houille (1). Une fois encore, la suprématie de la machine, infatigable et peu coûteuse, permettait de renvoyer les chevaux et traits dans les champs.

Ci-contre à gauche, illustration de différentes techniques de levage utilisées avant l'apparition et l'utilisation des énergies fossiles.

On retient Elisha Otis (1811-1861) pour avoir le premier, en 1853, sécurisé les monte-charges qu'on appela «monte-charges parachutes». Il installa également le premier ascenseur dans un magasin de New-York en 1857, qui était alimenté par une centrale à vapeur comme beaucoup de ceux de l'époque. Sa capacité était de 450 kilogrammes à une vitesse de 0,2 mètre par seconde (2).

Ci-contre à droite, Elisha Otis démontrant avec audace la fiabilité de son système d'arrêt d'urgence au Crystal Palace lors de l'exposition universelle de 1853 à New-York.



(1) Andrew Ure, *Philosophie des manufactures*, 1836, p. 45

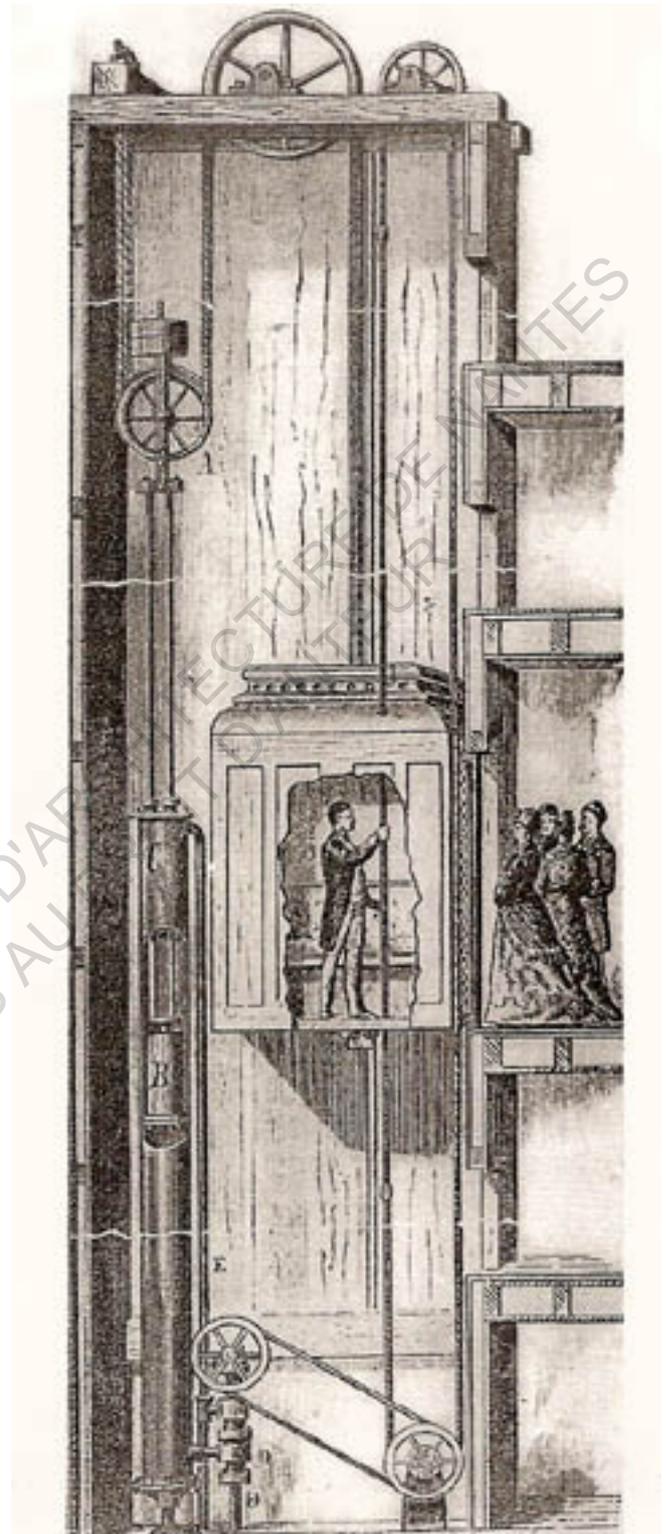
(2) <http://www.innovalor.com/david/otis.htm>



On doit l'appellation «ascenseur» à l'ingénieur Français Félix Léon Edoux, qui est le premier, en 1864, à breveter un système hydraulique appliqué aux monte-charges.

L'illustration ci dessus représente son dispositif présenté au monde, lors de l'exposition universelle de Paris de 1867. Ci-contre à droite, illustration d'un principe d'ascenseur hydraulique à piston Otis.

Comme toutes les inventions évoquées, l'ascenseur connu de nombreuses innovations au fil des années, avec le développement d'autres systèmes d'alimentation après la vapeur, comme l'électricité. Aujourd'hui les ascenseurs les plus rapides sont installés dans une tour à Guangzhou en Chine. Ces bolides atteignent une vitesse de pointe de 72km.h(3).



L'auteur Américain William T. Hogan écrit : «les ascenseurs sont devenus une partie essentielle de la construction des immeubles de bureaux. Ce nouveau moyen de transport vertical a entraîné un renversement complet des opérations de construction et des politiques de location.»(1) L'architecte Philippe Chaix écrit dans son livre «C'est avec la charpente métallique, la pompe à eau et la climatisation, l'une des techniques fondatrices de la construction verticale.»(2) L'ascenseur est bien une condition sine qua non de l'existence des gratte-ciel.

(1) *Histoire économique de l'industrie du fer et de l'acier aux États-Unis*, William T. Hogan, 1971

(2) *Les 101 mots des tours à l'usage de tous*, Archibooks, Philippe Chaix, 2014

(3) <https://www.batiactu.com/edito/l-ascenseur-le-plus-rapide-du-monde-depasse-les-70-38039.php>

Enfin, le dernier problème à surmonter, et le plus grand de tous sans doute est la raison. Il faut une motivation pour construire ces tours. Nous allons voir dans quelques «foyers de gratte-ciel» que si les contextes d'apparitions de ces tours divergent selon les situations et les époques, elles ont bien toutes un dénominateur commun.

I.2. Contextes d'apparitions des tours

C'est à Chicago aux États-Unis que les premiers gratte-ciel virent le jour dans la seconde partie du 19^e siècle. C'est à la suite de l'incendie dévastateur de 1871, que la ville eu besoin d'être reconstruite. On peut lire dans l'article consacré sur le site «History» (1) les origines supposées de cet incendie : «La légende raconte qu'une vache a donné un coup de pied au-dessus d'une lanterne dans une grange et a déclenché l'incendie, mais d'autres théories soutiennent que des humains ou même un météore auraient pu être responsables de l'événement qui a laissé une zone d'environ quatre milles de long et presque un mille de large de la Windy City, y compris son quartier des affaires, en ruines». Après cette catastrophe, comme souvent après de grandes crises, suivit une période de renouveau, marquée d'une forte croissance économique et démographique qui laissa place au sens propre, à l'expression d'une nouvelle typologie de constructions : les gratte-ciel. On peut dire que c'est bien une étincelle, littéralement, qui déclencha le premier cadre d'apparition des grands immeubles.



L'incendie de Chicago par John R. Chapin (1871)

(1) <https://www.history.com/topics/19th-century/great-chicago-fire>

Chicago

Ce sont donc les architectes de Chicago qui dessinèrent ces premiers grands édifices. Ces architectes, (dont William le Baron Jenney, Martin Roche et Louis Henry Sullivan), avaient dans leur expression très fonctionnaliste des bâtiments, une écriture héritée des styles classiques académiques et des Beaux-Arts bien qu'ils cherchaient à les rejeter (1). Ils désiraient en effet créer un «art américain»(3) qui se distinguerait de la vieille Europe. C'est ce qu'on appela l'École de Chicago.

On peut remarquer certains éléments revenant de manière régulière, voir systématique dans les constructions des immeubles de l'époque : une modénature importante, des corniches très travaillées sur les étages attiques, le tout étant découpé en travées régulières au parement minéral. On retrouve tous ces principes dans le Home Insurance Building (1885), le Monadnock Building (1891) ou bien le Wainwright Building (1891). Ces idées, d'ordre plus plastiques et esthétiques que structurelles ont influencées les autres grandes tours de cette époque de l'entre deux siècles (posons 1880-1920). On peut remarquer en effet un retour, une réinterprétation des styles anciens. C'est le cas du Neo-Gothique dans lequel s'inscrivent plusieurs bâtiments iconiques comme le Tribune Tower de Chicago (1925) ou bien le Woolworth Building (1913) de New-York.

Il faut cependant souligner que ces innovations techniques n'étaient pas en réalité les pionnières dans ce domaine. Il existait des constructions antérieures ayant fait usage de l'acier structurel et tout aussi «hardie» si ce n'est plus (4), comme la chocolaterie Menier conçue par l'architecte Français Jules Saulnier, qui possédait déjà un squelette en fer dès 1871.

Ci dessous de gauche à droite :

Guaranty Building, Buffalo, 1896 Louis Henry Sullivan - Monadnock Building, Chicago, 1891 Daniel Burnham et John Wellborn Root, à noter que ce bâtiment présente la particularité d'avoir une structure mixte charpente acier au Sud et murs porteurs en maçonnerie de 2m d'épaisseur au Nord.(5) - Wainwright Building, St-Louis, 1891 Adler & Sullivan



(1) *L'architecture moderne*, Infolio, Alan Colquhoun, 2006 p51-58

(2) https://fr.wikipedia.org/wiki/Home_Insurance_Building

(3) *Histoire de l'architecture moderne, tome 1 Révolution Industrielle*, Dunod, Leonardo Benevolo, 1998 p236-246.

(4) *Histoire mondiale de l'architecture et de l'urbanisme modernes, tome 1 idéologies et pionniers 1800-1910*, Casterman, Michel Ragon, 1970 p220-222

(5) https://fr.wikipedia.org/wiki/Monadnock_Building



Home Insurance Building - 1885 - 55m William Le Baron Jenney

Le Home Insurance Building est considéré comme le premier gratte ciel moderne. Il fut le premier à disposer d'un squelette en acier dans lequel on effectuait un remplissage de briques. Si on avait construit cet immeuble selon la méthode de murs porteurs, il aurait pesé 3 fois plus lourd qu'avec sa structure acier, et aurait de surcroît perdu en surface utile (2).

New-York

C'est avec New-York, que Chicago rivalisait pour le titre non officiel de « capitale des gratte-ciel ». En effet, si l'apparition des gratte-ciel à Chicago intervient suite à l'opportunité d'une reconstruction, la grande ville de la côte Est forte d'une attraction économique, commerciale et culturelle finit par concentrer de plus en plus de grands bâtiments. Ces constructions de l'entre-deux siècles ressemblaient fortement à celles de Chicago, comme le New-York Times Building (1889), où on retrouve les grands principes édictés par les architectes de l'École de Chicago. On constate en tout cas à cette époque, une course à la hauteur où chaque propriétaire, chaque ville cherche à montrer sa puissance par la plus imposante structure, dans cette Amérique en passe de devenir la plus grande puissance du monde.

Woolworth Building, 351m, New-York, 1913 Cass Gilbert

Chrysler Building, 320m, New-York,
1930 William Van Allen



Selon Eric Firley et Julie Gimbal (2), la raison de l'apparition de tant de gratte ciel à New-York vient également de son découpage. En effet, si New-York est une ville majeure sur le plan commercial, culturel et politique dès le début du 18e siècle, son découpage en damier de 2028 blocs d'une «extrême rigueur» s'ajoute à la pression foncière existante et devient un véritable «catalyseur de gratte-ciel».

C'est bien souvent, si ce n'est presque toujours, que les immeubles de grande hauteur servent à une démonstration, un étalage de puissance.

(1) <https://www.nyc.fr/visiter-new-york/building/empire-state-building/>

(2) *La tour et la ville, manuel de la grande hauteur* de Eric Firley, Julie Gimbal, éditions Parenthèses 2011



Empire State Building - 1931 - 381m Shreve, Lamb & Harmon

C'est sans doute le gratte-ciel le plus célèbre d'entre tous. Il détient le record de longévité du titre de plus haut bâtiment au monde qu'il conservera entre 1931 et 1967, avant que la tour Ostankino (tour de radio-télédiffusion de 540m à Moscou) ne lui prenne son titre. Cet immeuble de bureaux dans le style Art-Déco fût bâti avec une efficacité redoutable : 4 étages par semaine (1). La construction dura 1 an et 45 jours, ce qui permit à l'édifice d'être terminé avant la date prévue !

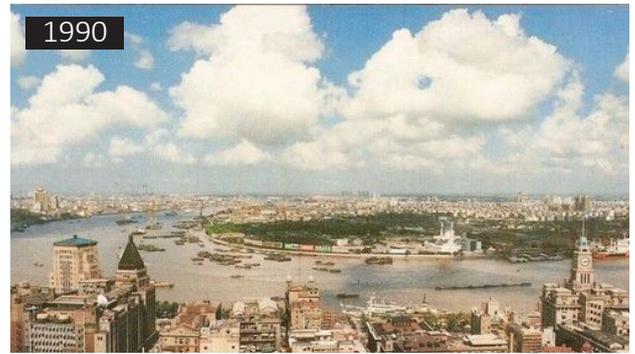
Shanghai

Un autre «cluster» de hautes tours est la ville de Shanghai. En l'espace de seulement 30 ans (1990-2020) la silhouette de la ville s'est transformée et s'est dessinée une skyline digne des plus grandes villes du monde occidental. Ce pas de géant est bien visible quand on compare les deux photographies avant-après de Shanghai, mais il est tout simplement sidérant quand on regarde deux autres chiffres.

Si 6 des 10 plus grandes tours du monde trônent désormais en Asie, c'est la Chine qui construit le plus et très (trop ?) vite (1). En l'espace de 3 ans, de 2011 à 2013 la Chine a utilisé plus de ciment dans la construction que les Etats-Unis durant tout le 20e siècle (2). Sachant que les cimenteries à elles seules sont responsables de 6% des émissions CO2 dans le monde, et que 72% de l'énergie primaire (énergie présente dans l'environnement dont l'exploitation ne nécessite pas de transformation) produite en Chine en 2017 est issue du charbon (3), on peut raisonnablement penser que les préoccupations environnementales passent bien après les préoccupations économiques.

Par ailleurs, ces tours qu'on pourrait qualifier de démonstratives de puissance économique et démonstratives du point de vue technique, ne sont pas pour autant des réussites. C'est le cas de la plus haute tour d'Asie, la Shanghai Tower, qualifiée «d'échec» selon les mots de la chaîne vidéo de construction B1M (4). Elle arrive en effet lors d'une mauvaise conjoncture économique et elle reste à moitié inoccupée jusqu'en 2018 où on peut voir à la nuit tombée, la moitié supérieure de la tour, inoccupée, plongée dans le noir. Elle devient malgré elle, non pas le symbole de la croissance Chinoise éternelle, mais au contraire celui de son ralentissement.

Une autre haute tour au triste destin est la Wuhan Greenland Center (ci-contre à droite), destinée à être la 2nd plus haute tour du monde (636m). Elle fut amputée de 100m pendant la construction, après un arrêt de 2 ans suite à des conflits de sécurité sur les couloirs aériens, abaissant sa hauteur à 500m.(5) Ainsi, depuis Août 2017 le chantier stagne, au 96e étage !



(1) *Les 101 mots des tours à l'usage de tous*, Philippe Chaix p13

(2) <https://www.lci.fr/international/ces-chiffres-qui-donnent-le-vertige-en-chine-la-siderante-boulimie-de-be-ton-1508207.html>

(3) https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_en_Chine

(4) <https://www.theb1m.com/>

(5) <https://asiatimes.com/2019/12/wuhan-skyscraper-fails-to-rise-to-great-heights/>



Shanghai Tower - 2016 - 602m
Gensler & Tongji Architectural Design

Avec ses 128 étages pour 632m, la Shanghai Tower est la 2nd plus haute tour de la planète. Elle répond premièrement aux besoins de bureaux dans la grande ville avec son million de m² occupable, et elle place la ville sur la scène internationale de part ses dimensions et son architecture si hardie.

Dubaï

Sur les rives du désert arabe, certains petits ports sont devenus en quelques décennies aussi de véritables villes, n'ayant rien à envier aux autres grandes villes du monde, si ce n'est peut-être une histoire (L'émirat de Dubaï fut fondé en 1970)(1). Ici il n'y a eu ni pression démographique ni géographique mais un attrait économique pur. C'est grâce aux milliards de pétro-dollars injectés dans la technique et l'ingénierie qu'une telle ville a pu se développer et devenir l'allégorie de l'arrogante ambition de l'Homme moderne à dominer son territoire. Contrairement à New-York, Chicago ou Shanghaï qui ont été des centres de vie, avant d'être un attrait qui permit leur rayonnement, Dubaï comme d'autres villes côtières du golfe Persique a brusquement surgit de terre, ou plutôt du sable. En l'espace de 20 ans, du désert a émergé une concentration de gratte ciel incroyable.

Si la ville essaye de se diversifier vis-à-vis de sa ressource première qu'est le pétrole, qui viendra nécessairement à manquer à l'avenir, on peut se poser des questions sur la pérennité d'une telle ville dans un futur où il fera plus chaud qu'aujourd'hui. Il fait déjà 26.7 degrés en moyenne sur l'année à Dubaï (2).

La Jeddah Tower (en construction ci contre à droite) est le projet de nouvelle plus grande tour actuellement en construction à Jeddah en Arabie Saoudite. Ce gratte ciel exceptionnel visait à franchir la barre très symbolique du mile (1609m), d'où son ancien nom «mile high tower». La tour vit cependant sa hauteur revue à la baisse due à la nature géologique du sol sur lequel elle allait reposer. La hauteur de la Jeddah Tower est donc envisagée à la hauteur encore une fois symbolique, du kilomètre de haut. Si les travaux ont commencés en Avril 2013, le projet est à l'arrêt depuis 2018, à une hauteur de 260m(3). Il semblerait qu'un changement de priorité du gouvernement Saoudien et d'une «purge» anti-corruption ait eu raison de ce projet, du moins pour l'instant (4).

D'autres projets de tour géantes ont été envisagés ces dernières années mais ont été stoppés ou annulés en cours de conception. C'est le cas de la Sky City Tower en Chine, qui devait mesurer 838m et accueillir 100 000 personnes ou encore la Dubaï Creek Tower, devant atteindre 1300m de haut. Mais dans ces deux exemples le stade des fondations n'a pas été dépassé. La Dubaï Creek Tower est à l'arrêt depuis 2017 et le terrassement effectué pour la Sky City One sert maintenant de ferme aquacole pour les habitants de la région (4).



(1) <https://www.tropicalemment-votre.com/destinations/a-propos-dubai.php>

(2) <https://fr.climate-data.org/asia/emirats-arabes-unis/dubai/dubai-705/>

(3) <https://theurbandevolver.com/articles/jeddah-tower-progress-update-worlds-tallest-tower>

(4) <https://www.youtube.com/watch?v=T4CCY9RJeD4>

(5) <https://www.youtube.com/watch?v=reDq7i56dnY>

(6) https://fr.wikipedia.org/wiki/Burj_Khalifa



Burj Khalifa - 2010 - 828m
Adrian Smith

La Burj Khalifa est la plus haute structure de la planète, culminant à 828m au dessus du niveau de la mer. La construction du plus grand des gratte-ciel a duré 5 ans (2004-2009), et nécessité 1.5 milliard de dollars pour assembler les 560 000 tonnes de matériaux durant les 22 millions d'heures de travail (5). Cette tour de 163 étages a eu pour première vocation d'être une tour résidentielle, puis a été investie de bureaux et d'un hôtel luxueux dans les derniers étages. Elle peut accueillir 35 000 personnes. Elle fut conçue par la célèbre compagnie Skidmore, Owings & Merrill, avec Adrian Smith en tant qu'architecte en chef et Bill Baker ingénieur en chef.(6)

Hong-Kong

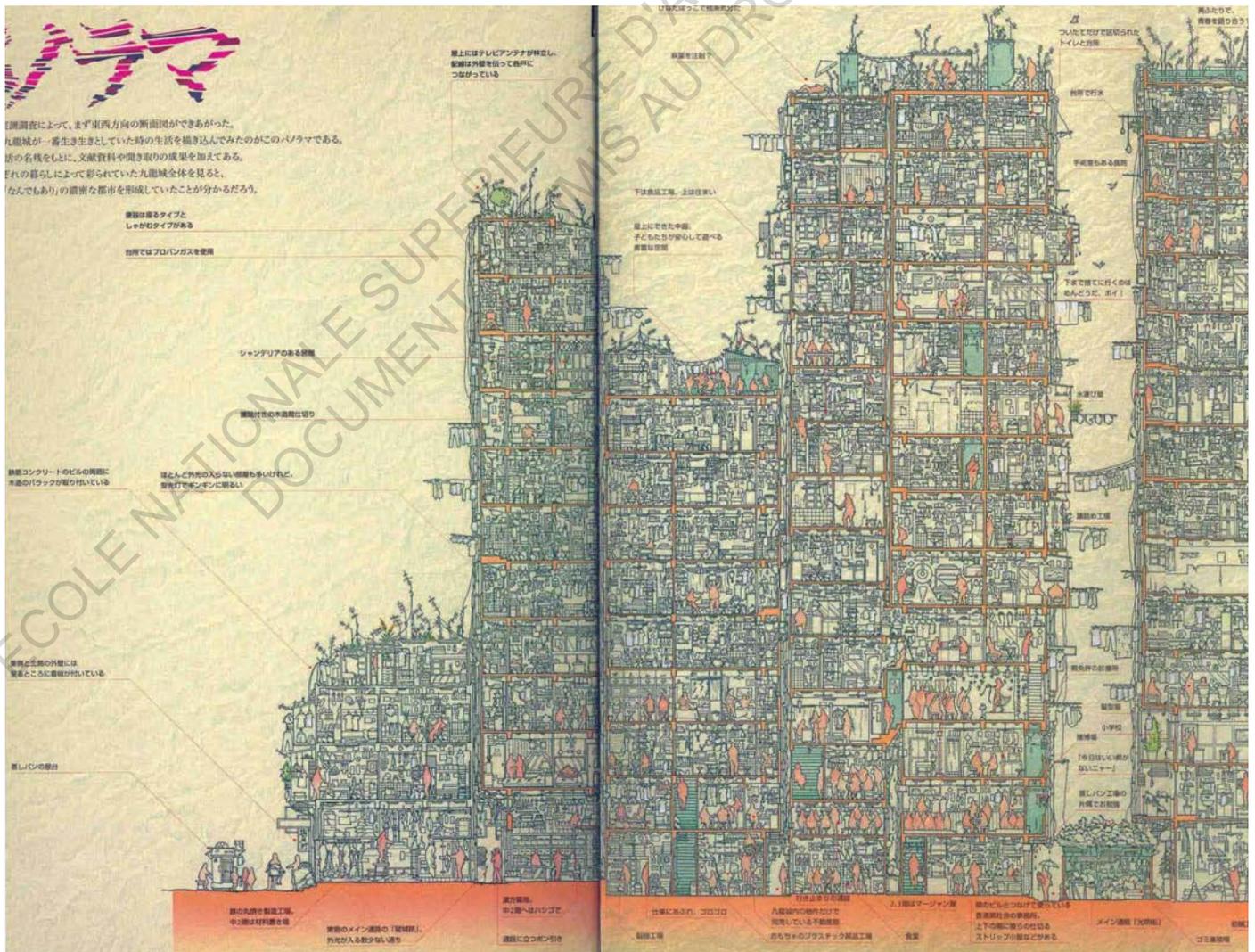
Comme sur l'île de Manhattan où se concentrent les grandes tours, on retrouve une pression foncière due ici aux limites géographiques, à Hong-Kong en République populaire de Chine. En effet, cette région administrative spéciale, autrefois colonie Britannique, présente l'une des plus forte densité de population de la planète : 30 000 habitants/km² si on tient compte des reliefs inconstructibles de la région (1). Cette pression à la fois démographique, due au contexte socio-économique favorable, et géographique, a entraîné l'apparition de très nombreux gratte-ciel. En effet, cette typologie de bâtiments est la plus efficace quand il s'agit de valoriser un seul terrain foncier.



C'est à Hong-Kong qu'on trouvait le lieu présentant la plus grande densité de population : La citadelle de Kowloon (ci-contre à gauche), et ses 50 000 habitants sur 0.027 km² soit 1.9 million d'habitants au km² en 1987. Peu avant sa démolition par le gouvernement en 1993, une équipe d'architectes et urbanistes Japonais a pu s'infiltrer dans la citadelle et en tirer son portrait. Leur travail a été compilé dans un livre où on peut retrouver des documents très détaillés de ce lieu, comme la coupe ci-dessous (2), nous permettent de nous faire une idée de la vie, quand on pousse la proximité et la densité humaine à son paroxysme.

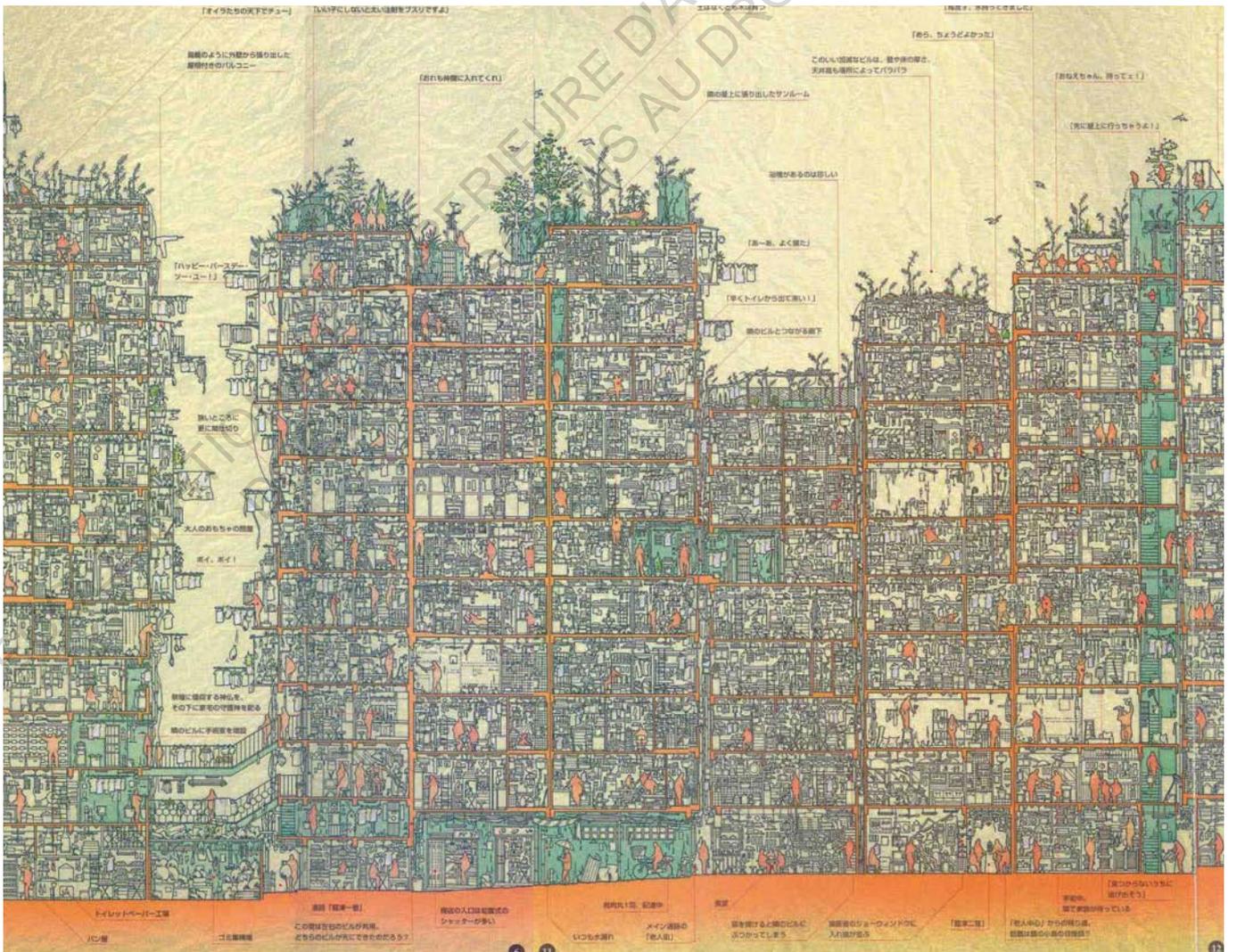
(1) https://fr.wikipedia.org/wiki/Hong_Kong

(2) <http://www.spoon-tamago.com/2014/10/28/detailed-cross-section-of-the-kowloon-walled-city-created-by-japanese-researchers/>





Panorama de Kong-Kong



Sao-Paulo

Les foyers de gratte-ciel que nous avons étudié jusqu'à présent étaient des ensembles destinés à abriter des bureaux, hôtels, résidences luxueuses etc. Mais dans d'autres cas, les tours sont construites dans le but de loger la population.

C'est le cas à Sao Paulo, au Brésil, qui compte environ 11 millions d'habitants et en fait la plus grande ville d'Amérique du Sud (1). Ici aussi, la grande tour est la réponse au problème d'utiliser le minimum d'espace. Contrairement aux grandes tours des «Star-chitectes» les tours de logements n'entendent pas à faire étalage d'une puissance quelconque, mais plutôt de proposer un cadre de vie le plus agréable, dans la mesure du possible. Selon les auteurs Eric Firley et Julie Gimbal, le système de tour «est encore un type de construction jeune, ce qui en fait une structure fondamentalement perfectible».(2) Nous nous pencherons d'avantage sur cet aspect de la tour, comme éventuelle réponse à l'urbanisation galopante, dans la troisième partie de ce mémoire.

Panorama sur les tours de Sao Paulo



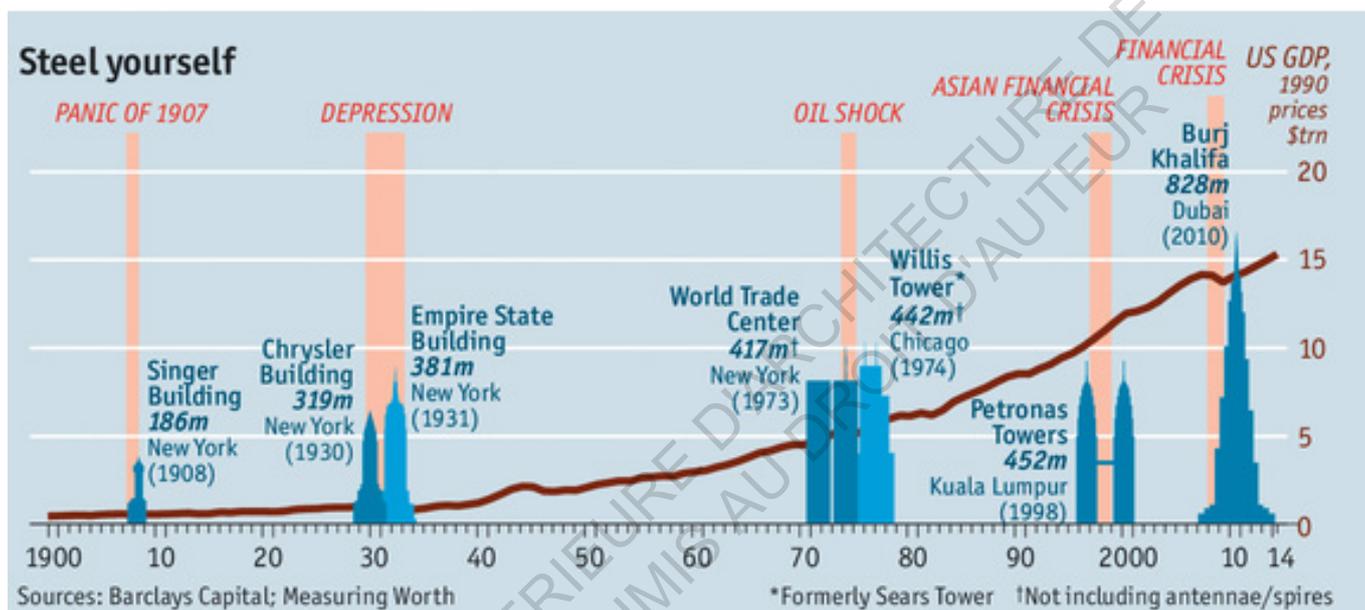
Dans tous les cas, la construction de toutes les grandes tours repose sur au moins un principe commun : le bon contexte économique. En effet, que ce soit pour les premiers gratte-ciel de Chicago, les super-tours chinoises, ou même les tours de logements d'Amérique du Sud, la construction de ces édifices n'est possible que dans des cadres favorables.

(1) https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A3o_Paulo

(2) *La tour et la ville, manuel de la grande hauteur* de Eric Firley, Julie Gimbal, éditions Parenthèses 2011

On peut donc trouver un autre dénominateur commun dans les contextes d'apparitions de ces tours, c'est le contexte économique. Un indice de la bonne santé économique se lit dans le taux de nouvelles constructions dans le pays, et c'est également vrai pour les IGH, à tel point que certains ont pu dresser un parallèle entre apparitions de grandes tours et crise économique (1).

Comme les cycles de Kondratiev (2) décrivent l'évolution du système économique capitaliste comme une succession de phase ascendantes et de phases descendantes, l'apparition de grande tours semblerait prévenir une période de crise pour le système économique. On peut lire dans un article sur WatchMarket du 19 Octobre 2019 (1) : «Historiquement, les marchés haussiers des actions et les bulles immobilières, en particulier dans l'immobilier commercial, vont de pair. La même exubérance irrationnelle qui persuade les investisseurs boursiers médiocres que tout ce qu'ils touchent se transforme en or infecte également les développeurs qui se servent à fond de l'argent bon marché près du sommet d'un cycle.». Evidemment, il s'agit de crises intrinsèques au système actuel. Les impondérables exogènes comme la crise mondiale du Covid19 aura sans doute un impact sans précédent mais ne saura être corrélée à la construction des immeubles de grande hauteur.



Plusieurs grandes crise économiques coïncident avec l'émergence des plus hautes tours de l'époque

Finalement, les gratte-ciel sont apparus à la fois grâce à l'émergence de nouvelles techniques issues des avancées de la révolution industrielle, et également lors de conjonctures économiques favorables. Cette «perfect storm» pour reprendre les mots utilisés par la chaîne B1M(2), est la convergence d'un contexte de croissance économique et la volonté d'une compagnie ou d'un pays à faire étalage de sa puissance, car c'est ce qui caractérise effectivement un des attraits des constructeurs pour les grandes tours. Si la typologie du gratte-ciel est bien née aux Etats-Unis au 19e siècle plutôt qu'en Europe (guerres fréquentes, culture ancienne et contraignante), il n'en reste pas moins que sa fonction première, à la base, est bien de rentabiliser un maximum un terrain. Comme a dit Cass Gilbert, l'architecte du Woolworth Building, le gratte ciel est « une machine à faire payer le terrain». Les gratte-ciel sont les enfants de l'union de la révolution industrielle et de l'essor du modèle de société capitaliste.

(1) <https://www.marketwatch.com/story/the-skyscraper-indicator-shows-were-near-a-market-top-2019-10-18>

(2) <https://major-prepa.com/economie/cycle-de-kondratiev/>

(3) <https://www.youtube.com/watch?v=T4CCY9RJeD4>



II. Les implications d'un tel édifice

Maintenant que nous avons vu comment la typologie du gratte-ciel est apparue à travers différents lieux et époques, nous allons nous intéresser à ce qu'implique au juste, une construction de l'ampleur d'un gratte-ciel. Nous parcourons ces implications depuis la structure en elle-même jusqu'à la place que les tours peuvent avoir dans le monde, en passant par les impacts que ces dernières peuvent avoir à l'échelle du quartier ou de la ville dans laquelle elles s'implantent.

II.1. Sur l'édifice en lui-même

Pour commencer à comprendre le gratte-ciel en tant qu'élément physique même, il faut l'imaginer comme un tout, comme un organisme formé de plusieurs organes, chacun interdépendant et assurant la tenue et la cohésion de l'ensemble. Nous allons voir quelles sont les différentes parties d'un gratte-ciel à travers les différentes forces et autres préoccupations physiques qui agissent sur ces parties.

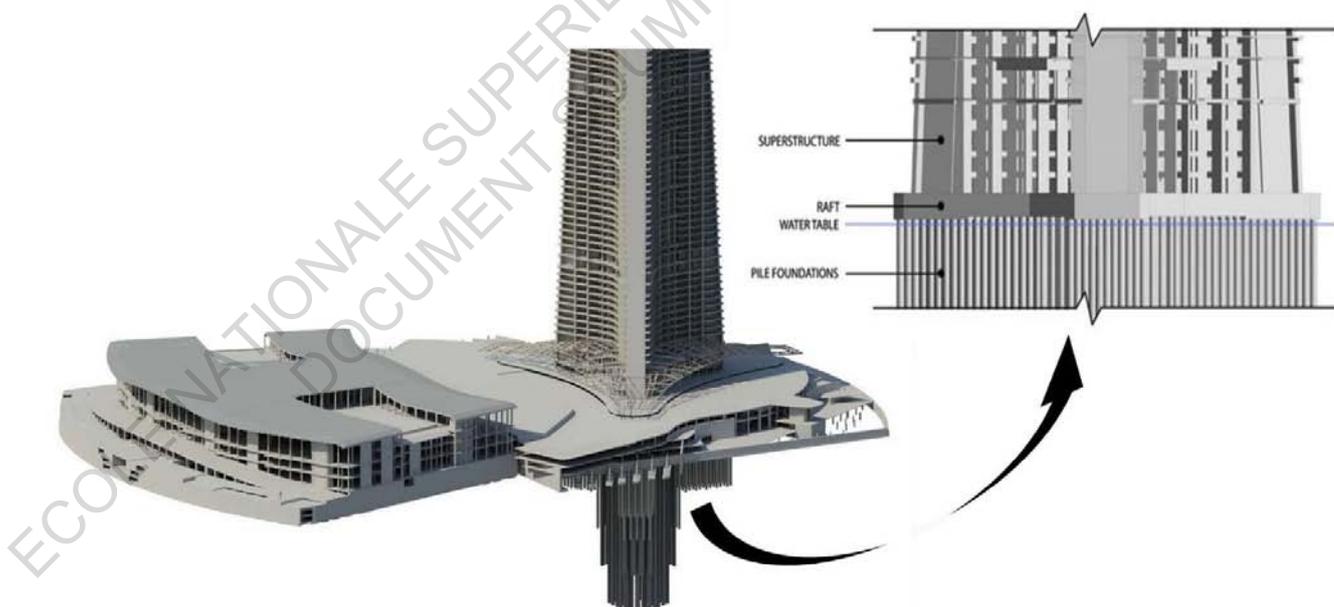
Les charges gravitaires

Premièrement, il faut distinguer 2 parties dans une gratte ciel : la substructure, et la super-structure.

Tout d'abord, la substructure est comme la partie immergée de l'iceberg, c'est la partie de l'immeuble sous terre qu'on ne voit pas. Il s'agit des fondations qui sont à la base de la tour, comme pour toute construction. Ces fondations peuvent prendre plusieurs formes, des piliers, pieux, longrines, radiers, mais elles cherchent toutes à atteindre une chose : le «dur» c'est à dire la roche. En effet, tous les sols ne se valent pas et on distingue plusieurs couches, plus ou moins profondes et de nature différente selon les lieux.

Une comparaison évocatrice est la suivante : L'île de Manhattan affleure à la surface d'un massif rocheux ce qui permet aux grandes constructions d'avoir de courtes fondations d'une vingtaine de mètres (pieux de 20mètres pour le World Trade Center de 1974). A Jeddah au contraire, la roche se cache sous plusieurs dizaines de mètres de roche calcaire et de sable, impropre aux fondations. Il a donc fallu établir des pieux de 120 mètres de profondeur, sous un radier d'une épaisseur de 5m pour envisager de construire la plus haute tour du monde (1).

Cette substructure, a pour but de reprendre l'ensemble des charges gravitaires de ce qui se trouve au dessus d'elle, et de les redistribuer dans le sol. Dans ces charges, on distingue 3 catégories. Les «live loads» sont le mobilier, le personnel, c'est à dire les charges d'utilisations variant en fonction du programme de l'étage en question, et ce à chaque étage de la tour. On a ensuite les «Dead loads», il s'agit des équipements fixés à la structure comme les lampes, les faux plafonds etc (2). Enfin, on a la structure ou super-structure, c'est à dire l'ensemble des éléments qui vont permettre la tenue de l'édifice.

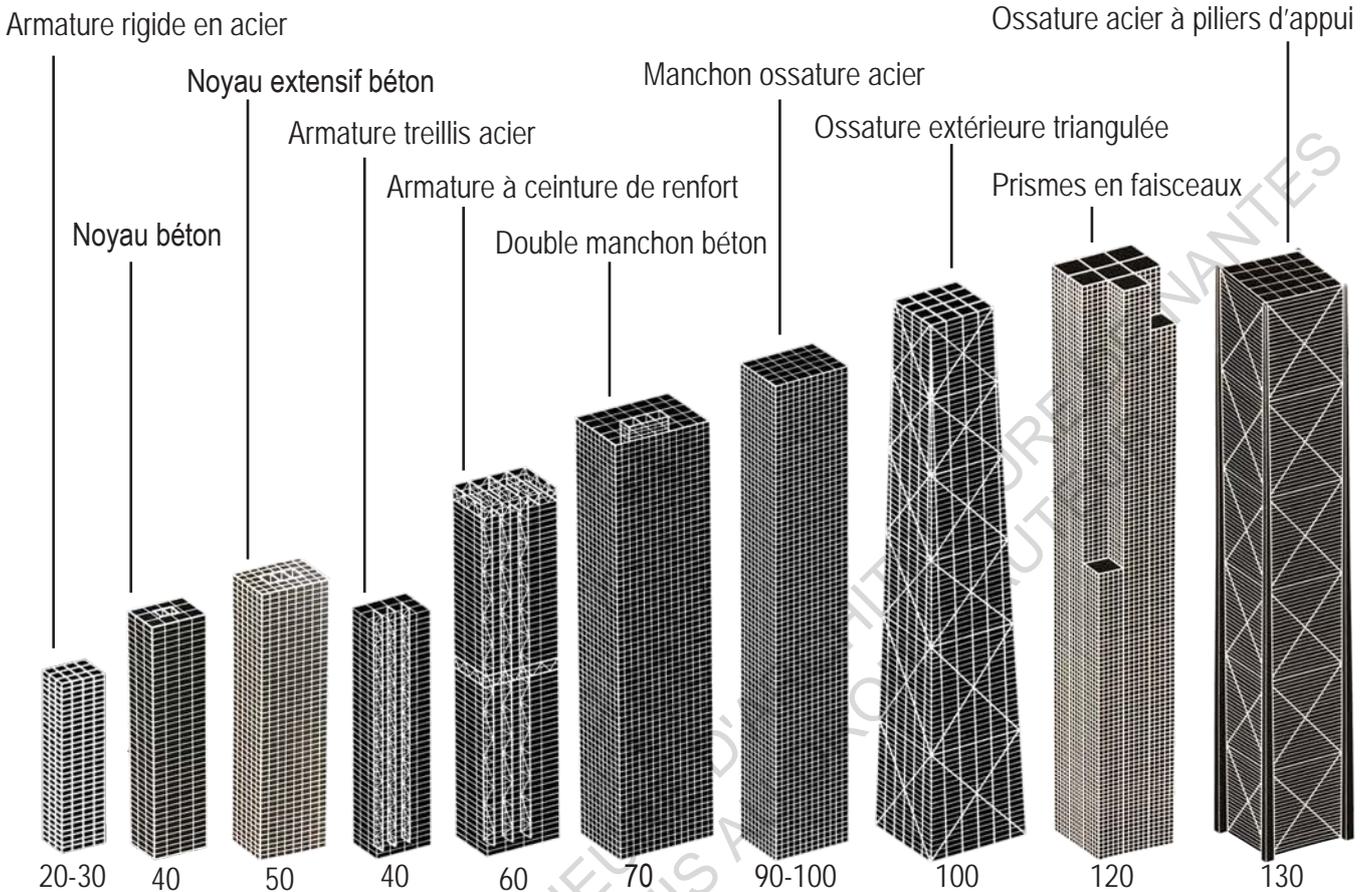


Ci-dessus, coupe et perspective révélant les dimensions hors normes des fondations de la Jeddah Tower, fondations mises en place en 2013.

(1) (<https://www.capital.fr/economie-politique/les-delires-de-la-plus-haute-tour-du-monde-1127653>)

(2) *The skyscraper bioclimatically considered design premier* - Academy Editions, Ken Yeang, 1996

La superstructure, ce qu'on voit se dresser dans le ciel, est elle même constituée de plusieurs parties. Premièrement, il y a le système constructif choisi, généralement en fonction de la hauteur de l'immeuble. Il existe plusieurs systèmes constructifs de gratte ciel, lesquels sont résumés par David Bennett dans son livre (1), les différentes méthodes sont nommées en fonction du nombre d'étages total de la tour :



Au sein de ce système, on retrouve les planchers se superposant les uns sur les autres. La construction des derniers étages d'une tour reste un défi technique. En effet, pour le coulage des murs au 155e étage de la Burj Khalifa, l'opération effectuée de nuit (pour éviter la surchauffe diurne) utilise un moteur de 630CV pour faire monter les 25 tonnes nécessaires à plus de 700m de haut : le béton met 40min à atteindre cette hauteur (2) !

Le béton, un mélange de ciment, d'eau, de sable, et de granulats (connu depuis l'antiquité Romaine) est un matériau de prédilection dans la construction des gratte-ciel. En effet, cette matière produite en quantité monstrueuse (6 milliards de m cube par an) en fait le matériau minéral le plus consommé au monde juste derrière l'eau potable. Cette immense production en fait une matière tout à fait abordable : 10 à 15\$ la tonne pour le tout venant (3). De plus, la main d'œuvre n'a pas à avoir une grande qualification grâce à la relative simplicité de mise en place, comparativement à la précision requise pour des structures acier, qui est l'autre matériau de prédilection dans la grande hauteur. Ces deux matériaux sont utilisés pour leurs très bonnes caractéristiques physiques en terme de reprise de charges gravitaires importantes. Par ailleurs, le béton à une prise assez lente : au bout de 7 jours il atteint environ 75% de sa résistance finale (3). En règle générale on parle d'une durée de 28 jours pour considérer qu'une dalle béton soit prise entièrement, même si la totalité des réactions chimiques ne seront effectivement terminées qu'au bout de plusieurs années.

Maintenant que le gratte ciel dispose de sa substructure et super-structure, il pourrait théoriquement accueillir ses occupants et leurs besoins. Cependant, quand un immeuble dépasse 20-30 étages la force prépondérante sur la conception cesse d'être la force gravitaire verticale, mais un ensemble de forces latérales (4).

(1) *Le grand livre des gratte-ciel - Solar*, David Bennett préface Norman Foster, 1997

(2) <https://www.youtube.com/watch?v=reDq7i56dnY>

(3) <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1374-production-mondiale-de-beton.html>

(4) *Performative skyscraper tall building design now - Balcony Press*, Scott Johnson, 2014

Le vent

En effet, dans le cas des tours de grande hauteur, c'est le vent qui a l'impact le plus fort sur la conception et au delà de 300m, le vent peut grandement influencer si ce n'est dicter la morphologie du bâtiment (1).

En effet, comme les grands pins balancent les jours de tempête, les tours oscillent avec le vent. Plus on monte en altitude plus le vent va être fort, et l'ensemble des forces réparties sur toute la structure au vent fera osciller la construction selon la direction perpendiculaire à celle du vent (2). L'ingénieur structure Leslie.E.Robertson, ayant travaillé sur l'ancien World Trade Center de New-York, raconte : « l'oscillation des derniers niveaux d'un gratte-ciel est comparable aux mouvements d'un bateaux, ils peuvent provoquer le mal de mer ». En effet selon Ken Yeang, le mouvement induit à cause du vent peut causer un grand inconfort, à tel point que ce critère de mouvement vis à vis de l'inconfort devient prédominant sur la simple résistance face à la force du vent de la part de la structure (une tour moins confortable est moins habitable donc plus difficilement rentable)(1).



Le 30St Mary Axe «gherkin»
Foster + Partners 2003.

Cet immeuble au cœur de Londres ne présente aucunes arrêtes et neutralise donc la pression du vent. On peut voir sa structure apparente en tessellation (ou triangulation) qui répartit les charges et efforts plus uniformément qu'une morphologie parallélépipédique qui concentrerait ces efforts aux arrêtes.



Burj Khalifa -SOM- 2010

Dans le cas de la Burj Khalifa (déjà évoquée page 28), c'est sa morphologie en fuseaux qui va dévier le vent dans des directions différentes, rebondissant sur d'autres décroché et évitant donc l'accumulation de contraintes sur une partie précise de la structure (2).

(1) *The skyscraper bioclimatically considered design premier* - Academy Editions, Ken Yeang, 1996

(2) <https://www.youtube.com/watch?v=reDq7i56dnY>

Les assauts du vent ne se manifestent pas seulement dans l'oscillation de la tour mais également par de potentiels dégâts sur les façades des immeubles. Le vent soufflant selon une direction précise, vient créer de part et d'autre de l'immeuble une zone de surpressions (sur la façade au vent) et une zone de dépression sur la façade sous le vent. Les pressions négatives sur les façades abritées du vent font souvent plus de dégâts que les pressions positives sur les faces au vent : les ruptures de vitre lors des tempêtes arrivent car le vitrage est comme aspiré à l'extérieur et tombe. Les vitres sont soumises à des contraintes variant selon leur exposition (façade Nord/Sud - façade généralement au vent ou sous le vent) et leur position sur l'immeuble : si ce sont les mêmes gabarits de fenêtre sur toute la tour, les fenêtres d'en haut devront être plus épaisses que celles du bas.

Sears Tower / Willis Tower - Chicago -
1974 - Skidmore, Owings and Merrill - 442m



Dans le cas de la Sears Tower à Chicago, le sommet du gratte-ciel a une amplitude maximale d'oscillations de 15cm (1). Cette tour est construite selon le principe structurel de prismes en faisceaux, permettant d'obtenir une tour remarquablement stable. Mais même avec une telle structure, en cas de vents violents, supérieurs à 100 km.h, le phénomène devient assez préoccupant et entraîne certaines mesures de sécurité. Quand les oscillations sont de l'ordre de 30 cm tout en haut, le centre de contrôle ralentit les ascenseurs et peut imposer des pauses tous les 10 étages pour contrer les possibles effets d'oscillations à l'intérieur des cages d'ascenseurs. On raconte même que les jours de grands vents certaines fenêtres vibrent tellement, que certains employés, peu rassurés, quittent leurs bureaux (2).

Il existe une très grande variété de verre hautement ingénierisé, avec tout un panel de paramètres variables. Si des paramètres comme la couleur et la transmissivité sont communs à l'ensemble des verres, ceux utilisés dans les gratte-ciel doivent avoir des caractéristiques particulières. En effet, l'énergie Solaire est captée par la structure, avec une différence entre ses parties exposées et protégées, induisant des dilatations de l'édifice sous l'effet de la chaleur, rendant nécessaire la mise en place de verres de hautes capacités physiques. On peut citer par exemple un verre très résistant comme le verre trempé ou verre laminé : un verre renforcé avec une couche de polyvinyl-butyl, ou encore le «heat strengthened glass» consistant en un verre dont les procédures de fabrication jouent sur le refroidissement plus ou moins rapide du matériau. Il faut savoir que si le verre peut être très résistant une fois mis en place, il est extrêmement fragile et vulnérable lors de sa fabrication. Quand il est encore frais, un simple souffle à sa surface réduit sa résistance d'un facteur 2, selon Suresh Gulati (3), ingénieur chercheur au sein de la American Ceramic Society. Cependant, si les caractéristiques physiques du verre sont très importantes, le cadre dans lequel il s'insère l'est tout autant.

(1) <https://www.youtube.com/watch?v=reDq7i56dnY>

(2) *Le grand livre des gratte-ciel - Solar*, David Bennett préface Norman Foster, 1997

(3) *Performative skyscraper tall building design now* - Balcony Press, Scott Johnson, 2014



John Hancock Tower à Boston, 240m, Architectes : Henry Cobb de IM Pei and Partners, 1976.

Cette tour construite en 1976, présenta un défaut sur le cadre de ses fenêtres : Plusieurs se décrochèrent durant la construction et encore après, si bien qu'à un moment donné plus de 4000m² de façade de l'immeuble n'avait plus de fenêtres et était remplacée par du contre-plaqué. En effet, chacun des 10 344 panneaux de verre constituant les façades était conçu selon une superposition de plusieurs épaisseurs de verre, de vide et de chlore, le tout encasté dans un cadre en métal. C'est la jonction entre ce cadre et la couche de chrome qui entraîna le problème : la jonction trop stricte du cadre à la fenêtre ne permettait pas à cette dernière de vibrer ou se dilater selon la météo. De ce fait, la liaison entre la fenêtre et le cadre se fissurait et finissait par rompre. Pour pallier le problème, l'ensemble des panneaux fut intégralement remplacé par du verre trempé, aux frais du fabricant de fenêtre d'origine (1).

Pour anticiper la réaction des tours face aux sollicitations du vent, on utilise des modèles de simulations numériques mais aussi des essais en soufflerie à l'aide de maquettes à différentes échelles. C'est le travail de la soufflerie du CSTB (Centre Technique et Scientifique du Bâtiment)(2) à Nantes que j'ai eu l'occasion de visiter. Lors des tests en soufflerie, les ingénieurs modélisent le contexte de l'immeuble afin d'étudier l'impact que ce dernier aura sur son quartier afin de déceler à l'avance d'éventuels problèmes, et de proposer des solutions pour palier aux phénomènes perturbateurs. Il existe plusieurs méthodes afin de comprendre les phénomènes physiques au sein de la maquette une fois au vent, comme des petites sondes de pitot implantées à différents endroits de la maquette et mesurant une différence de pression et donc de la vitesse du vent; ou encore une insertion de fumée lors de l'expérience, rendant visibles les vortex et perturbations générées par les maquettes.

(1) <https://civildigital.com/failure-john-hancock-tower-boston-mass/>

(2) <https://www.cstb.fr/fr/cstb/etablisements/nantes/>



Selon Ken Yeang (1) un bâtiment est conçu pour résister à un événement climatique d'occurrence centennale, qui est la durée de vie estimée d'un bâtiment de grande hauteur. Par ailleurs, il n'existe pas vraiment de norme dans les DTU (Document Technique Unifié) pour normer ces oscillations. Il existe cependant des «règles de pouce» que les constructeurs ont établi de manière empirique et qui posent des limites. On peut lire dans le livre de David Bennett (2) «Les effets de poussée qu'exerce le vent ne doivent pas dépasser la hauteur du bâtiment divisé par 500». On peut trouver également une autre règle un peu plus précise avec Ken Yeang (3) selon laquelle dans les années 70-80 une règle informelle limitait à 2% de l'accélération gravitationnelle de manière horizontale, les oscillations d'édifice, 1 fois tous les 10 ans (sans doute lors d'un événement climatique d'occurrence décennale). Evidemment, certains gratte-ciel vont devoir répondre à d'avantage de sollicitations en fonctions des aléas climatiques et géologiques, notamment vis-à-vis des séismes.

Les séismes

Car en effet, les séismes sont une grande menace pour les constructions de grande hauteur : ces phénomènes naturels agissent également comme force latérale qui fera osciller une tour.

La première chose qu'il faut savoir est que tous les endroits de la planète ne se valent pas en matière d'implications sismiques. Premièrement, certaines zones plus exposées que d'autres, doivent répondre à des normes para-sismiques en conséquence. C'est un cas d'école que nous allons voir avec Taïwan, extrêmement sollicitée en matière de tremblements de terre car située sur la ceinture de feu du Pacifique, tout comme l'est en fait une bonne partie de l'humanité en Asie.

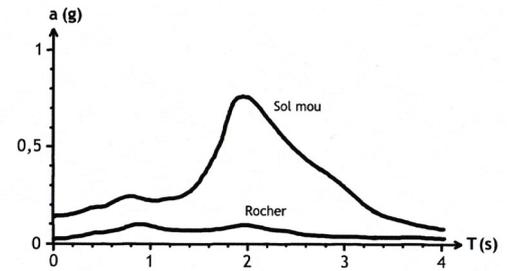
Ensuite, tous les sols ne se valent pas. Certains sont plus «mous» (sables, roche calcaire) et d'autres plus «durs» (roche) ce qui aura un impact sur la propagation des ondes dans le sol : elles se déplaceront plus rapidement dans un sol dur et auront de facto une fréquence plus haute, et inversement. Enfin, la configuration morphologique d'une tour (élancement, matériaux, masse) confèrera une fréquence d'oscillation propre à la construction, et plus cette dernière est haute, plus sa fréquence est basse et vice-versa. Ainsi, quand une tour haute se trouve soumise à des sollicitations sismiques sur un sol «mou», les fréquences des ondes dans le sol et de celles de la tour sont toutes les deux basses, ce qui amplifie cette dernière : c'est le phénomène de résonance.

(1) *The skyscraper bioclimatically considered design premier* - Academy Editions, Ken Yeang, 1996 p128

(2) *Le grand livre des gratte-ciel* - Solar, David Bennett préface Norman Foster, 1997 p42

(3) *The skyscraper bioclimatically considered design premier* - Academy Editions, Ken Yeang, 1996 p122

Ci-contre à droite, un exemple de spectre de réponse sismique (accélération) en fonction du type de sol, lors du séisme de Mexico en 1985. La géologie de Mexico est marquée par un sol particulièrement «mou», rendant plus vulnérables certaines catégories d'ouvrages. On peut voir que les bâtiments d'une fréquence propre de 2 secondes, bâtis sur le sol mou, ont «surréagit» à la sollicitation sismique contrairement à ceux bâtis sur un sol dur.



Les constructeurs de tours, et pas seulement, cherchent à éviter ce phénomène qui va induire des oscillations plus importantes qu'en temps normal et donc des sollicitations structurelles d'autant plus importantes.

Pour éviter ce phénomène il existe de nombreuses techniques para-sismiques. Premièrement, le plus gros du travail peut être effectué sur la conception de l'édifice en tant que tel. Il s'agit de concevoir une construction qui sera la moins susceptible d'entrer en résonance et qui en règle générale présentera la plus faible oscillation. Pour se faire il faut tenir compte du terrain et bâtir selon la nature du sol : éviter les constructions souples et élancées sur les sols «mous» ou les constructions massives et basses sur des sols «durs». Toujours sur la morphologie même de la tour, il faudrait privilégier des ensembles de volumes séparés par des joints parasismiques plutôt qu'un seul grand volume. Ou encore privilégier des formes évasées vers le bas, y concentrant la majeure partie de la masse, plutôt que vers le haut ce qui amplifierait les oscillations. En fait, le rêve d'un bureau d'étude-structure est que son architecte imagine une pyramide : c'est la forme la plus efficace contre les séismes !

Outre le fait de concevoir des constructions plus aptes à résister en cas de tremblements de terre, les bâtisseurs firent preuve d'ingéniosité en imaginant plusieurs systèmes techniques permettant de pallier aux oscillations. On peut citer le principe d'isolation-sismique qui a pour but de dissocier le mouvement de la substructure de celui de la superstructure. En effet, la substructure fait corps avec le sol, elle est donc animée du même mouvement que ce dernier lors d'un séisme. Afin d'éviter que la superstructure soit frappée du même mouvement, on isole la substructure à l'aide de plusieurs dispositifs, ce qui diminue les forces transmises de la substructure à la superstructure (1).



Parmi les dispositifs d'isolation parasismique, on peut voir les isolateurs «secs» en néoprène fretté qui vont absorber l'énergie cinétique en se déformant (ci-dessus à gauche) ou encore des amortisseurs viscoélastiques qui s'actionneront lors de l'apparition des accélérations sismiques.(ci-dessus à droite)

(1) http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/Polycopie_de_conception_niveau_concepteur.pdf

Une autre technique parasismique se trouve tout en haut, à l'autre extrémité du gratte ciel : l'oscillateur à masse accordée. Il s'agit, comme son nom l'indique, d'une masse précise, qu'on place en haut d'une construction, et qui va avoir le rôle de «contre balancer» les oscillations de l'immeuble.

L'exemple le plus connu est celui de la tour Taipei 101 à Taïwan. Cette tour, dont la morphologie en pagode est inspirée du roseau local, est l'une des plus haute du monde, classée 10e plus haut gratte ciel avec 509 mètres. Le 31 Mars 2002, Taïwan encaisse un violent séisme de magnitude 6.8 mettant à rude épreuve la tour géante encore en construction : 2 grues géantes au 56 étage s'effondrent faisant 5 décès parmi les ouvriers.(1)

Pour contrer les effets des séismes mais aussi des typhons de la région, du 87e au 91e étage de la tour se trouve un amortisseur de 660 tonnes. Cette boule en acier de 5m de diamètre permet de réduire de 30 à 40% les oscillations de la tour. Du reste, l'oscillation maximale de la tour serait de 3m lors des sollicitations maximales (lors des typhons) rendant très peu commode l'habitabilité à ce moment la, mais montrant tout de même à quel point une telle structure peut encaisser une grande force latérale grâce à sa flexibilité. (2)



A gauche, le Taipei 101, haut de 509m, conçu par C.Y. Lee & Partners Architects, achevé en 2004. A droite, une photographie donnant l'échelle de l'oscillateur, en suspension sur une hauteur de 4 étages, maintenu à l'aide de larges câbles d'aciers et de vérins hydrauliques à sa base.

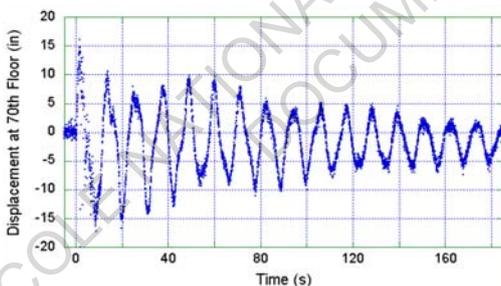
(1) <https://www.youtube.com/watch?v=reDq7i56dnY>

(2) https://fr.wikipedia.org/wiki/Taipei_101#Structure

L'impact latéral

Enfin, un impact latéral est la dernière force envisageable pour un immeuble, la plus rare mais qui existe quand même. Les événements du 11 Septembre 2001 en sont la parfaite illustration.

Le complexe du World Trade Center construit en 1974 par l'architecte Japonnais Minoru Yamasaki était un ensemble de 7 bâtiments dont les deux joyaux étaient 2 tours jumelles de 410 mètres de haut. Le lendemain du premier attentat contre le World Trade Center (explosion d'une voiture piégée dans les sous sol le 26 février 1993) l'ingénieur en chef du complexe, John Skilling, déclara dans le journal Seattle Times : «We looked at every possible thing we could think of that could happen to the buildings, even to the extent of an airplane hitting the side» et «Skilling's people did an analysis that showed the towers would withstand the impact of a Boeing 707.» (1) L'éventualité d'un tel événement avait été déjà été envisagé lors de la conception des tours, et ces dernières encaissèrent effectivement l'impact des aéronefs (2).



Ce graphique ci contre à gauche, montre l'oscillation de la tour Sud suivant l'impact. (image ci dessus). L'amplitude maximale d'oscillation montre un déplacement de 40cm, l'équivalent de 40% des déplacements subis en cas d'ouragan.

Mais si les tours géantes résistèrent aux impacts initiaux, le feu engendré par l'explosion et la combustion des 30 tonnes de kérosène, associé aux fournitures de bureaux et autres combustibles, a eu raison d'elles. John Skilling et son équipe d'ingénieurs avaient déjà identifié le problème principal, mais ils n'imaginaient pas un anéantissement total de ces tours de 110 étages : «Our analysis indicated the biggest problem would be the fact that all the fuel (from the airplane) would dump into the building. There would be a horrendous fire. A lot of people would be killed,» (...) «The building structure would still be there». (1)

(1) <https://archive.seattletimes.com/archive/?date=19930227&slug=1687698>

(2) <https://www.youtube.com/watch?v=zF-94yDHk8>

Si le monde entier se souvient des événements du 11 Septembre, bien peu de gens savent qu'un autre immeuble de la même ville avait lui aussi subi un impact aérien quelques décennies auparavant.

Le 28 Juillet 1945, un épais brouillard enveloppe l'île de Manhattan rendant difficile la navigation aérienne. Un bombardier B-25 Mitchel se perd au dessus de l'Hudson et percute l'Empire State Building entre le 78e et 80e étage. Les 3 membres d'équipage ainsi que 11 personnes dans l'immeuble perdent la vie. Si l'événement est très impressionnant, il n'inflige au bâtiment finalement que des dégâts modérés et les affaires purent reprendre aux étages inférieurs le lundi suivant.

L'impact laisse quand même un trou de 5m par 6m dans la façade Nord du gratte-ciel et déclencha un incendie qui sera maîtrisé en trois quart d'heure. C'est toujours à l'heure actuelle le seul incendie majeur à avoir été maîtrisé à une hauteur si élevée.



Une heureuse anecdote de ce triste événement est qu'une opératrice d'ascenseur, Betty Lou Oliver, détient le record de survie à la plus haute chute d'ascenseur après être tombé du 75 étage, les câbles ayant été sectionnés à l'impact et les systèmes d'arrêts d'urgence n'ayant pas fonctionné, la Chance !

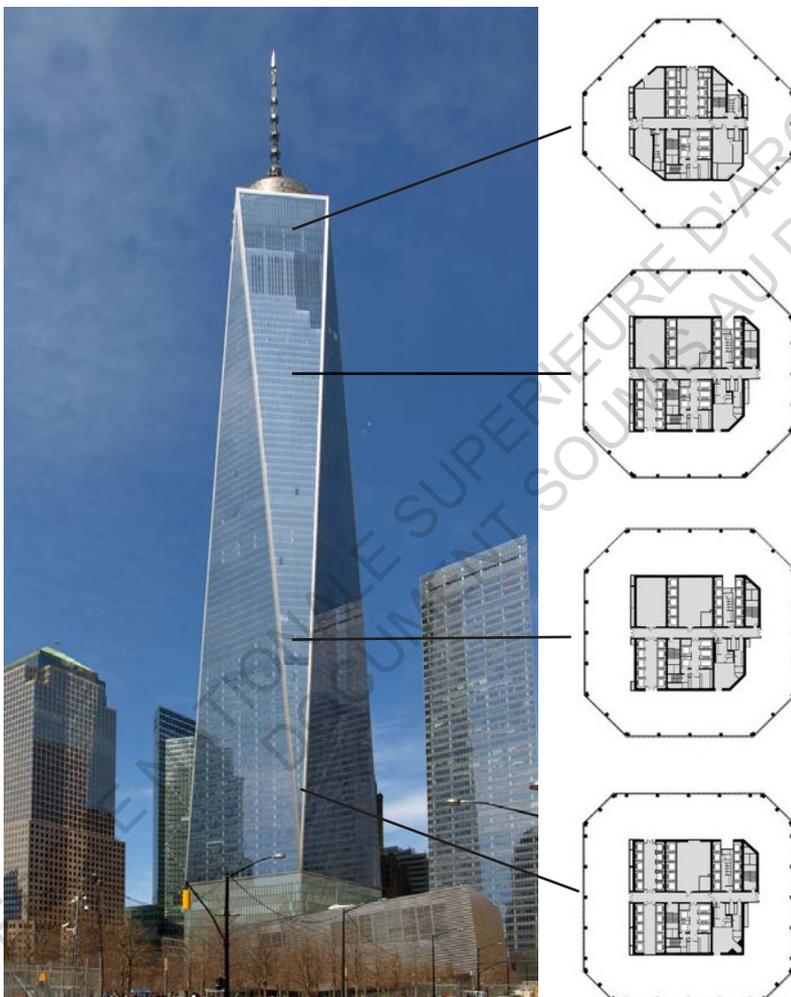
Les deux exemples présentés sont les deux événements majeurs dans le monde des tours de grande hauteur ayant impliqué des dommages considérables. Il existe plusieurs autres exemples mais les aéronefs concernés sont généralement des aéronefs de petite taille et occasionnant très peu de dégâts ainsi que le seul décès du pilote.

Le contreventement

Pour répondre à toutes ces sollicitations latérales possibles et les transmettre dans le sol, on utilise le système de contreventement : un ensemble de dispositif structurel dans le plan vertical permettant de limiter les déformations de la construction.

Le principe le plus utilisé dans les tours de grande hauteur consiste à renvoyer les efforts de la structure périphérique sur laquelle s'exerce les efforts horizontaux au noyau central qui assure la rigidité de l'édifice et permet de transmettre les efforts jusqu'aux fondations. Mais cette technique du noyau consomme de la place et impose un plan d'étages strictement identique de bas en haut : Le noyau représente en moyenne 28% du coût total de la structure et prend environ 25% de l'espace d'un étage (1).

Cependant il existe d'autres techniques afin d'assurer la rigidité de l'édifice, comme l'association d'un noyau central avec une ossature en acier périphérique comme pour le John Hancock Center à Chicago. Mais cette technique consomme beaucoup de matière aussi : «30% de l'ossature en acier d'un gratte ciel est consacrée à son contreventement» (2). Ce chiffre montre bien la place qu'a cette partie du gratte-ciel au sein de l'ensemble.



One World Trade Center - 417m - 2013 - Skidmore Owings & Merrill.

Le plus haut gratte-ciel d'Amérique illustre bien le principe de noyau central sur lequel repose le contreventement. Le noyau cours sur toute la hauteur de la tour et reprend à chaque étage les forces s'exerçant sur les façades.

(1) *The skyscraper bioclimatically considered design premier* - Academy Editions, Ken Yeang, 1996

(2) *Le grand livre des gratte-ciel - Solar*, David Bennett préface Norman Foster, 1997 p64



John Hancock Center - 344m - Skidmore Owings & Merrill - 1981

Ce gratte-ciel de Chicago a la particularité d'exposer en façade une partie de son système de contreventement. On distingue très facilement les diagonales réparties sur toute la hauteur, divisées en plusieurs sections d'une vingtaine d'étages chacune. Ces diagonales agissent de telle façon à ce que quand une force latérale déforme la structure, elles réagissent en opposant une force de traction qui vient empêcher le déformement des sections dans lesquelles elles s'insèrent. Ces réactions se produisant sur l'ensemble de l'édifice, elles assurent sa stabilité face aux diverses forces latérales.

Nous venons de voir quels étaient les différentes forces affectant un gratte-ciel : une composante verticale de part la gravité, et une composante horizontale de part le vent, les séismes ou encore les impacts d'aéronefs. La tour en tant que telle, est maintenant une structure stable, capable d'abriter un usage sécurisé vis-à-vis de la stabilité de l'édifice. Se pose maintenant un problème relatif à son usage en tant qu'espace de vie pour personnes : la sécurité, relative aux incendies et aux déplacements dans la tour.

Le risque incendie

Nous l'avons déjà évoqué, un incendie dans un gratte-ciel est la pire crainte pour les constructeurs, à l'image des feux dans les navires ou les avions c'est à dire dans un espace limité et difficilement accessible, qui mettra en danger la vie des occupants et la structure du bâtiment. Pour parer à un éventuel incendie, il existe au sein des tours des systèmes de protections passives et d'autres actives.

Les premières, passives, consistent en la protection à priori de l'environnement à l'intérieur de la tour. Pour les éléments structurels en acier, très sensibles à la chaleur, on utilise des enduits projetés, de la peinture intumescente ou encore du flocage fibreux (voir photos ci-dessous) qui une fois projeté sur la structure va protéger cette dernière d'une élévation rapide de sa température. C'est d'ailleurs la défaillance de cette première « ligne de défense » anti-incendie qui fut responsable de l'effondrement initial des tours jumelles du World Trade Center, selon le NIST (National Institute of Standards and Technology)(1), le flocage s'étant volatilisé avec l'impact.



(1) <https://www.nist.gov/topics/disaster-failure-studies/faqs-nist-wtc-towers-investigation>

La seconde préoccupation à avoir en matière de protection passive est le choix de matériaux peu inflammables, que ce soit dans le choix du matériel dédié à l'utilisation par les occupants, du système structurel, ou vis-à-vis de la décoration intérieure des sols, des murs, ou des plafonds. On caractérise les éléments selon 2 critères : la réaction au feu, c'est à dire la contribution plus ou moins forte de l'élément vis-à-vis du brasier; et la résistance au feu, c'est à dire la capacité de l'élément à assurer son rôle physique (porteur, séparateur) pendant une certaine durée (1). Cette partie de la «ligne» de défense passive n'est pas à prendre à la légère : depuis 2012, 3 incendies majeurs se sont produits dans différents gratte-ciel à Dubaï. Selon Phil Barry, consultant en sécurité incendie, le problème vient de l'extérieur et plus précisément des panneaux en aluminium recouvrant les gratte-ciel. Ces panneaux ont la particularité d'être thermoplastiques (qui ramollissent sous la chaleur, comme beaucoup de matériau) et finissent par s'enflammer facilement quand ils sont soumis à une source de chaleur importante (2).

Enfin, lors de la conception, on effectue un véritable compartimentage du gratte-ciel, à l'image des compartiments étanches d'un navire, afin de circonscrire le feu dans la seule zone où il a débuté et ainsi préserver la sécurité dans les autres parties de la tour. Ces compartiments divisent une tour, en espaces de 2 500 m² maximum. Ces espaces doivent être étanches aux fumées et aux flammes afin de contenir l'incendie et éviter sa propagation. En cas de sinistre isolé à un compartiment, les personnes présentes à l'intérieur de celui-ci peuvent être évacuées vers les zones supérieures ou inférieures (3). Dans les zones où se trouvent les escaliers, on met en place des zones d'attente ou zones refuge dans le cas où des personnes seraient dans l'incapacité de pouvoir descendre (escaliers obstrués, personnes à mobilité réduite) et devraient attendre l'arrivée de secours (4).

Ensuite, il y a des mesures actives, qui vont entrer en action au moment de l'incendie afin de limiter la propagation de ce dernier et protéger un maximum les occupants.

On peut citer dans ces mesures active le système de Sprinkler : un mécanisme déversant de l'eau en grande quantité équivalente en ordre de grandeur à une forte pluie d'orage. Cette quantité d'eau dépend du nombre de tête de sprinkler, du volume d'eau en réserve et de la surface en question. Certaines législations obligent à un double système de sprinkler si l'épaisseur d'un faux plafond dépasse 1m. (6)



Il existe également des systèmes de détection avancé comme au sein de la Sears Tower de Chicago. La détection automatique de fumée enclenche immédiatement après détection des mesures physiques en même temps que l'alarme : «le rendement des pompes thermiques et échangeurs se modifie et la pression de l'air augmente pour évacuer la fumée» (7).

(1) <https://www.knauf.fr/qui-sommes-nous/blog/3-points-incontournables-reglementation-incendie-igh>

(2) <http://video.lefigaro.fr/figaro/video/dubai-des-gratte-ciel-qui-s-embrasent-un-peu-vite/4740432437001/>

(3) <https://securite.securitas.fr/decryptage/reglementation-igh>

(4) <https://www.linternaute.com/actualite/grand-projet/1138779-les-chiffres-incroyables-de-burj-dubai/1138791-securite>

(5) <https://www.sfp73.fr/4ighssiap1.html>

(6) *The skyscraper bioclimatically considered design premier - Academy Editions, Ken Yeang, 1996 p187*

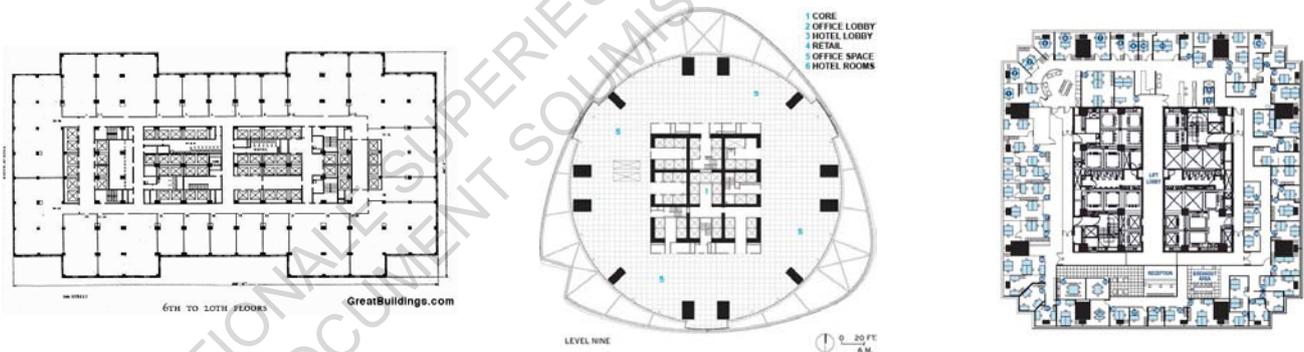
(7) *Le grand livre des gratte-ciel - Solar, David Bennett préface Norman Foster, 1997 p33*

Enfin, la présence de services de secours à proximité immédiate de l'édifice est parfois réglementaire. C'est le cas en France, où un immeuble est classé IGH lorsque son dernier plancher habitable se situe au dessus des 50m de hauteur si la construction est à destination résidentielle et 28m de hauteur pour tout autre usage. Cette catégorie d'immeuble donne lieu à nécessité d'avoir un centre de secours à moins de 3 km de la tour, ainsi qu'un poste central de sécurité se trouvant au niveau de l'accès pompiers en base de la tour (1).

La dernière mesure anti-incendie reste la prévention. Des exercices d'évacuations sont menés de temps en temps dans les tours de grande hauteur comme à la tour First, la plus haute tour de France (225m) en Octobre 2018. L'évacuation des 3200 salariés présents à nécessité 80 minutes (2). Il est en effet capital d'apprendre à faire évacuer un immeuble dans un laps de temps le plus court possible, tout en évitant l'apparition d'un phénomène de panique.

Evacuation : point sur les circulations

L'évacuation d'une tour, et en temps normal tous ses déplacements verticaux se font en un même lieu : le bloc de circulation. En effet, la typologie, la logique du plan, déjà héritée des premiers gratte-ciel, veille à regrouper au même endroit tous les éléments devant parcourir la tour sur sa hauteur. C'est généralement à l'intérieur, au cœur de la tour que se trouve le noyau où on va retrouver l'ensemble des gaines fluides (ventilation, eau) et électriques, les sanitaires et bien-sûr les éléments de circulation verticales : ascenseurs et escaliers. Cette partie de l'immeuble est qualifiée comme « L'inévitable bloc de circulation rectangulaire », par Scott Johnson (3), montrant bien la récurrence presque systématique de cette configuration dans les gratte-ciel. Selon Bryan Lawson (4), le principal obstacle à l'élan vertical (hauteur des structures) n'est pas forcément le côté technique, c'est surtout les circulations et services qu'on a besoin de faire transiter par la partie basse de la tour jusqu'à son sommet.



Plans de gratte ciel précédemment évoqués de gauche à droite : Empire State Building - Shanghai Tower - Taipei 101.

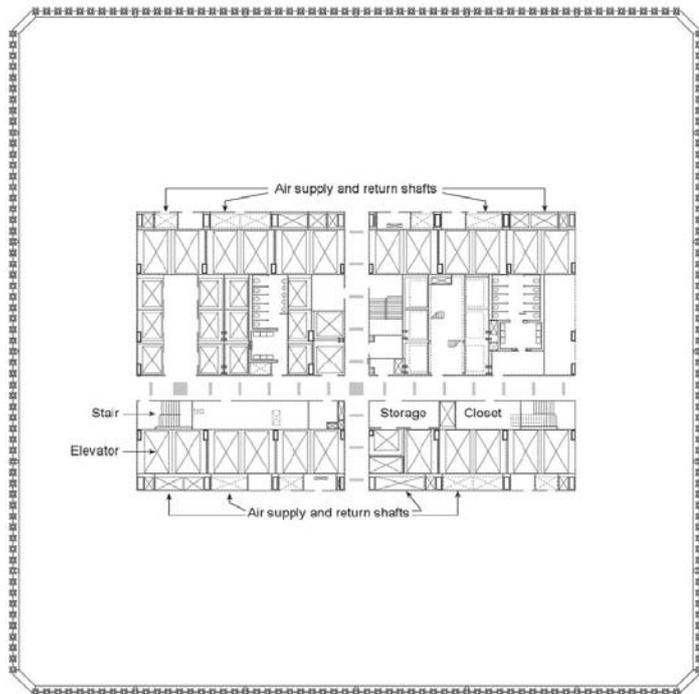
Ces quelques exemples de gratte ciels illustrent bien la forme simple du noyau central qui revient dans les 3 cas, indépendamment de la morphologie singulière de chaque tour. On peut noter au passage pour le cas de la Shanghai Tower, d'un visuel extérieur si hardi (cf pages 27 et 83), qu'elle présente finalement un plan d'étage circulaire d'une grande simplicité.

(1) <https://securite.securitas.fr/decryptage/reglementation-igh>

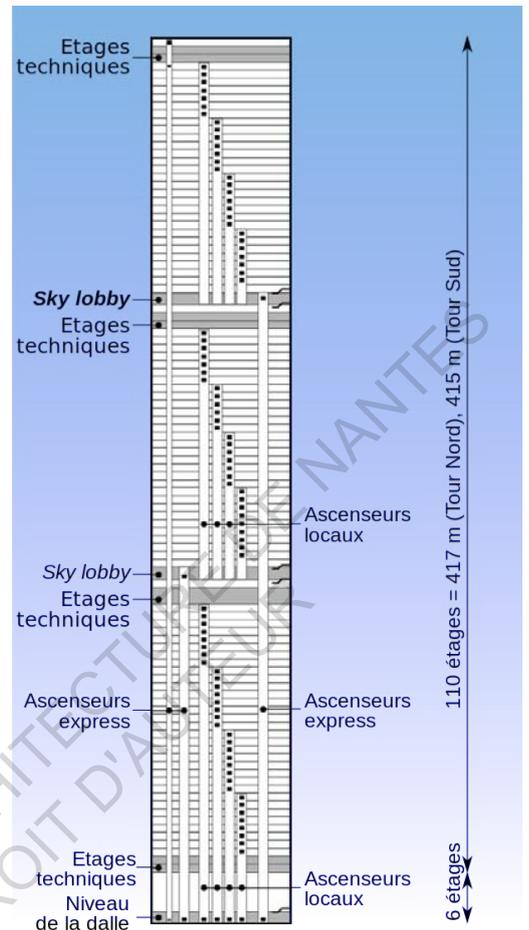
(2) <https://defense-92.fr/securite/la-plus-haute-tour-de-france-evacuee-en-quatre-vingt-minutes-58538>

(3) *Performative skyscraper tall building design now* - Balcony Press, Scott Johnson, 2014

(4) *The skyscraper bioclimatically considered design premier* - Academy Editions, Ken Yeang, 1996 p188



Le plan ci dessus était celui d'une tour du World Trade Center. Ce plan illustre bien le principe de construction en «manchon à ossature acier» évoqué plus tôt (cf page 37). Ici, 128 colonnes périphériques reprennent 40% des charges gravitaires, laissant les 60% restants aux colonnes intérieures, situées dans le noyau de la tour.



L'exemple du World Trade Center :

Au cœur de chaque tour se trouvait l'ensemble des 99 ascenseurs et des escaliers, constituant ainsi la partie la plus solide du bâtiment. On peut remarquer que dans le cas de ces grandes tours, comme pour d'autres gratte ciel de par le monde, le système de circulation verticale est lui même découpé en plusieurs sections. Il y a en effet, 3 parties distinctes qui fonctionnent indépendamment les unes des autres. Elles sont tout de même reliées par des étages de transfert, ici au 44e et 78e étage, appelés «Sky lobbies» et reliées au sol par des ascenseurs express de grande capacité. Ainsi, cette méthode de répartition des ascenseurs permet d'économiser énormément de place. L'espace utilisable passe de 62% à 75%, n'ayant pas besoin d'avoir les 99 ascenseurs sur toute la hauteur de la tour (1). On pourrait considérer qu'il s'agissait en fait de 3 petites tours (de 135m chacune tout de même) mises les unes sur les autres, chacune d'entre elle reliée au sol par un ascenseur express.

(1) https://fr.wikipedia.org/wiki/World_Trade_Center

Cependant, une critique est faite par Ken Yeang (1) sur l'emplacement systématique au centre de la tour. En effet, dans le cas du World Trade Center, lors de l'attentat de 1993, beaucoup des 1000 personnes blessées le furent car elles trébuchèrent lors de l'évacuation presque dans le noir dans le noyau central, certaines lumières s'étant éteintes. Si ce noyau avait été placé en périphérie, il aurait pu être éclairé de manière naturelle, et les occupants n'auraient pas trébuché. Comme nous le verrons dans la dernière partie du mémoire, l'architecte Malaisien Ken Yeang avance d'autres propositions quant à la localisation du noyau de circulation au sein de la tour.

Dans un article de KJA, une firme de consultation sur les ascenseurs dans la grande hauteur (2), il est fait constat qu'il n'existe pas de consensus sur la marche à suivre en cas d'évacuation d'immeuble vis-à-vis des ascenseurs. Faut-il utiliser les ascenseurs ou pas ? La firme d'ascenseurs Allemande ThyssenKrupp, a opté pour l'utilisation de ses ascenseurs lors des évacuations. Le principe de leur technique est de rendre tous les ascenseurs d'un même groupe au plus haut sky lobby, leur faire ouvrir leurs portes en même temps pour accueillir les usagers avant de les redescendre en sécurité, pour recommencer cet aller-retour jusqu'à ce que la tour soit vide. Cette technique permettrait d'évacuer rapidement des étages en hauteur, en évitant les mouvements de panique.

Cette même firme est actuellement en train de développer des ascenseurs horizontaux dans sa tour d'essai ThyssenKrupp à Rottweil (3)(4). Cette nouvelle technique permettrait d'utiliser plus de machines dans une seule cage d'ascenseur, et augmenterait de 50% la capacité de transport pour une seule cage, libérant ainsi plus d'espace de plancher. Chiffre intéressant à savoir : Plus de 100 millions de trajets sont effectués en ascenseur par jour rien qu'en France, faisant de l'ascenseur le moyen de transport le plus utilisé (5).



Ascenseurs modulaires verticaux et horizontaux hautement ingénierisés - Tour thyssen krup

Toujours dans l'article de KJA (2), un parallèle y est dressé entre l'utilisation des canots de sauvetages d'un navire uniquement quand ce dernier est en train de couler et l'utilisation des ascenseurs quand le bâtiment menace un effondrement. Mais comment savoir à quel moment dire « là il y a un risque d'effondrement ? » dans la situation de l'urgence qui plus est. Par ailleurs, nous n'avons pas de recul, aucune « jurisprudence » possible sur l'effondrement d'un gratte-ciel suite à un incendie. Seulement 3 bâtiments de grande hauteur se sont effondrés suite à un incendie : les 3 tours du World Trade Center (WTC 1,2 et 7). Seul le dernier, le WTC 7 voit son effondrement uniquement imputable au feu : «The collapse of WTC 7 represents the first known instance of the total collapse of a tall building primarily due to fires (rapport NIST (6)). Mais le cas de cet effondrement est toujours sujet à controverses comme le montre un rapport de l'université de la University of Alaska Fairbanks publié en Mars 2020 concluant que le feu seul n'aurait pu provoquer la ruine de l'édifice (7).

(1) *The skyscraper bioclimatically considered design premier* - Academy Editions, Ken Yeang, 1996

(2) <https://www.kja.com/building-evacuation-p153878&language=fr>

(3) *Performative skyscraper tall building design now* - Balcony Press, Scott Johnson, 2014

(4) <https://www.youtube.com/watch?v=UGtMuJJZ1g>

(5) https://immobilier.lefigaro.fr/article/six-chiffres-etonnants-sur-les-ascenseurs-en-france_eb7f279e-bc8e-11e6-bc1b-42b2e77b1716/

(6) <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/NCSTAR/ncstar1a.pdf>

(7) <https://www.prnewswire.com/news-releases/university-report-on-911-building-collapse-contradicts-official-conclusions-301029854.html>

Avec ce que nous avons vu jusqu'à présent, la tour en tant qu'entité est maintenant complète. Elle dispose d'une substructure permettant de soutenir la masse du bâtiment et une superstructure capable d'accueillir ses occupants dans des conditions de sécurité optimales et confortables. Mais jamais une tour ne s'est dressée seule au milieu du néant : elles sont systématiquement accompagnée d'un contexte, d'un quartier, sur lequel elles auront un impact certain.

II.2. L'impact de la tour sur son environnement

Apport économique et infrastructurel

L'apport d'espace d'un gratte-ciel sur un quartier est conséquent : plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés de surface utilisable peuvent être créés. Sur cette surface, répartie selon l'axe vertical, on retrouve de très nombreux métiers, réparties en une multitude d'activités et services. En fait, un gratte-ciel peut être considéré comme «une ville dans la ville» (1).

L'exemple de la Sears tower de Chicago est particulièrement illustratif. A l'aube, aux premières lueurs, la tour vide se réveille doucement avec les «petites» mains finissant les patrouilles dans les étages et d'autres encore terminant le nettoyage. Chaque nuit c'est plus de 100 m cube de déchets, d'ordures diverses des offices, magasins et restaurants qui finissent dans l'un des 3 compacteurs de 31m cube de la tour dans les sous sols. Une fois compacté des compagnies spécialisées évacueront les compactas. L'exemple du débarassage de ces déchets nous rappelle que la tour n'est, évidemment, pas autonome : elle dépend de ce qui l'entoure, du monde extérieur. Si on peut trouver vraiment de tout dans cette tour : restaurants, salle de sport, coiffeur, et même un dentiste (1), aucune de ces activités ne pourraient exister sans un apport continu de matériel, de denrées ou de services. On comprend dès lors que l'implantation d'une tour dans un quartier, va générer en plus de sa fonction principale (bureaux par exemple), une myriade d'autres activités pouvant générer vie économique et emploi : c'est donc un apport plutôt positif de ce point de vue.

Par ailleurs, cette petite ville dans la ville entretient bel et bien un lien physique à son contexte et cela commence par le visuel : sa façade. En effet, l'enveloppe du bâtiment, ce qui est donné à voir, peut renvoyer une image et peut même devenir une vitrine.

A travers les époques et les styles architecturaux, un procédé de façade s'est développé pour finalement devenir le style dominant dans les gratte-ciel : le mur rideau. Il s'agit d'une partition de la façade en cadre, le plus souvent en aluminium dans lesquels viennent s'encaster des panneaux de verre. Cette technique permet à la fois un apport maximal de lumière naturelle pour les occupants à l'intérieur, mais permet également de conférer une transparence, une légèreté à l'immeuble, contrastant avec le volume qu'il impose.

(1) *Le grand livre des gratte-ciel - Solar*, David Bennett préface Norman Foster, 1997

Pour certains bâtiments, on peut qualifier les façades «d’informatives» dans le sens où ce mur vertical va servir de support à la projection d’images ou spots publicitaires. L’architecte Paul Virilio qualifie ces nouveaux médias sur les façades des immeubles de «electronic Gothics» pour la comparaison avec l’architecture Gothique des églises Européennes du Moyen-Age, véhiculant des messages historiques, bibliques ou moraux sur les vitraux. On peut lire chez Scott Johnson (1): « the commercial tall building can be further monetized beyond it’s net rentable area » et « a Building skin is both an enclosure system and a public surface ». Il s’agit donc bien d’une surface d’affichage, où on va se montrer et donner quelque chose à voir, ce qui induira une scénarisation de l’espace public, à la manière d’une scène de théâtre.



Publicité d’un jeu vidéo, déployée sur toute une façade d’immeuble



La légendaire intersection de Times Square, cœur battant de la publicité à outrance

Après l’impact visuel direct qu’on peut avoir aux abords de l’immeuble via la façade, la zone de contact entre la tour et le sol peut lui aussi impacter l’espace urbain.

L’interface entre le gratte-ciel et le quartier est sujet à de nombreuses configurations spatiales possibles. Les configurations dépendent notamment des choix architecturaux mais aussi du contexte existant.

Dans un tissu urbain déjà établi, les usagers de la tour pourront trouver un ensemble de services déjà présent. Ces services (alimentation, transport etc) seront d’ailleurs soumis à des afflux, provenant de la tour, importants et pendulaires qui seront susceptibles de les saturer. A contrario, dans un quartier en développement, où les services sont encore absents, le gratte-ciel pourrait être plus isolé et donc engendrerait une série de modification urbanistique nécessaire à son fonctionnement.

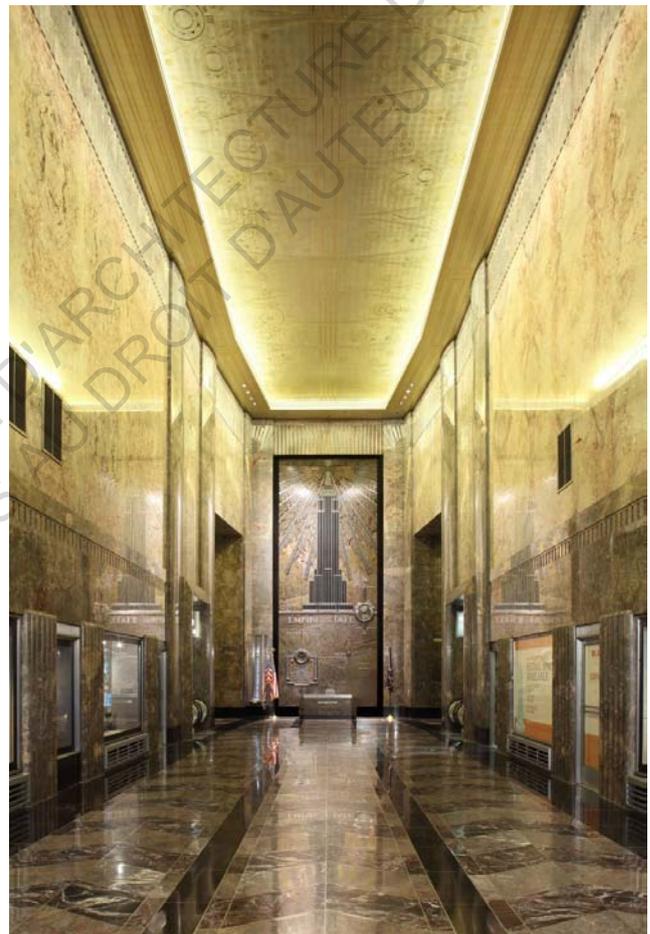
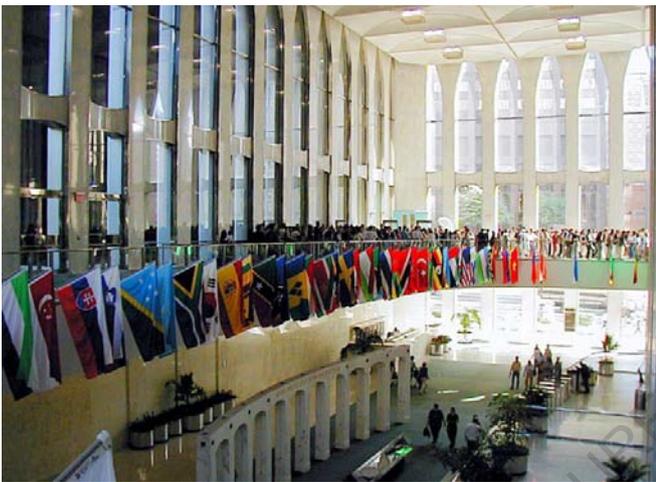
Dans un quartier «nouveau», encore en développement ou en restructuration lourde, l’apparition de gratte ciel est souvent accompagnée par de grandes places ou «plaza» cherchant à proposer un espace plus ouvert, laissant plus de place «pour respirer» à côté de la tour. Cependant, ces plaza cherchent également à asseoir la monumentalité de l’édifice et sont dans quelques cas peu acceptés par la population locale (2), comme la Tour de Bretagne à Nantes ou encore La défense à Paris.

(1) *Performative skyscraper tall building design now* - Balcony Press, Scott Johnson, 2014

(2) *La tour et la ville, manuel de la grande hauteur* - éditions Parenthèses, Eric Firley, Julie Gimbal, 2011 p243

D'autre part, ces configurations sont naturellement grandement affectées par les choix architecturaux. On peut en effet proposer un véritable prolongement de la rue à la base de la tour, en créant des lobby accessibles au public. On offre ainsi la possibilité de rejoindre une autre rue en traversant le hall de l'immeuble ainsi qu'une grande quantité d'espace pour absorber les pics de populations. Au sein de ces lobby, on peut observer en règle générale une succession ordonnée d'espaces, un séquençage qui va permettre notamment une vue claire des accueils et ascenseurs dès l'entrée dans le bâtiments.

Ces halls de gratte-ciel sont généralement les endroits de l'immeuble avec la plus grande hauteur de plafond, sur plusieurs étages, jouant avec le volume d'entrée en proposant des demi niveaux reliés au sol par un ensemble d'escalier et d'escalators séparant les différentes populations (travailleurs, visiteurs, entretien etc). En effet dans le cas des grandes tours plus qu'ailleurs (du aux quantités requises), une séparation des flux est nécessaire. En effet, il est important de dissocier l'entrée «noble» celle des occupants de la tour, de celle de «service» qui servira à l'exploitation de la tour, comme les éboueurs cités dans le cas de la Sears Tower à la page précédente.



Ci-dessus en haut à gauche, le lobby du World Trade Center de 1974. Juste dessous, le lobby du Taipei 101 et à droite, le hall de l'Empire State Building, au style Art-Déco.

Enfin, l'intégration au tissu urbain passe par tout un système de connectivité avec les infrastructures de transport public ainsi qu'avec les flux piétonniers et routiers. En effet, on remarque que beaucoup de grandes tours se sont érigées à proximité de centre de transport, notamment ferroviaire comme la tour Montparnasse. (Montparnasse) ou encore de stations de métro, à l'image de la gare de Santiago Calatrava au pied des nouvelles tours de Ground Zero. (Sud Manhattan).



L'Oculus - Santiago Calatrava - 2011 - Entrée de ce hub de transport au pieds des grandes tours du WTC.



La Tour Montparnasse - Saubot, Beaudouin, Cassan, Hoym de Marien - 1973 - 210m, face à la grande gare éponyme.

Cependant, si les tours peuvent avoir ces impacts économiques et spatiaux sur le domaine public, elles ont également un impact physique sur ce dernier, loin d'être négligeable.

Impact physique

En effet, outre l'impact visuel que nous avons commencé à décrire, les tours de grandes hauteurs ont deux impacts physiques majeurs sur leur environnement.

Comme nous l'avons vu, le vent est un facteur déterminant dans la conception des tours de grande hauteur. Si ces grandes structures résistent bien au vent, auquel elles font obstacle à son écoulement naturel et l'environnement immédiat de la tour peut s'en retrouver grandement impacté.

En effet, si on surnomme Chicago la ville venteuse ou «Windy City», ce n'est que depuis l'apparition de ses gratte-ciel ! La grande ville du MidWest n'est pas plus venteuse qu'une autre ville Américaine : 16,6 km/h de vitesse moyenne du vent à Chicago contre 20,0 km/h pour Boston par exemple (1). A noter que les relevés de vitesse de vent se font généralement sur un terrain plat dépourvu de perturbations : les aéroports. A Chicago comme dans d'autres villes abritant des gratte ciel, plusieurs phénomènes peuvent se combiner : effet Venturi, vortex descendant de la tour, effet de rue canyon. Ces phénomènes peuvent générer par endroit des situations allant de l'inconfort au drame.

(1) https://fr.wikipedia.org/wiki/Windy_City

Un gratte-ciel illustrant bien cet impact est la Bridgewater Place (112m), d'Aedas, à Leeds au Royaume-Uni. Lors de sa conception, l'impact aérodynamique qu'aurait la tour vis à vis de son environnement n'avait vraisemblablement pas été assez étudié. Depuis son ouverture en 2007, 21 plaintes furent déposées (1), par des piétons et cyclistes violemment projeté au sol suite à de fortes rafales descendant de la tour. En Mars 2011, un camion de livraison se renversa à cause du vent généré par la tour, tuant un piéton (1). Pour palier à ce problème, l'administration du gratte-ciel, après consultation d'experts, a mis en place un système de grillage déflecteur permettant de casser le vent descendant de la tour pour protéger (au mieux) les personnes et véhicules au niveau du sol.



Beetham Tower - 2006 - Ian Simpson - 169m
Surnommée «Humming Tower» ou encore «Angry Tower»

Dans un registre moins dramatique, la relation qu'une tour entretient avec le vent peut avoir des répercussions acoustiques. A Manchester, au Royaume-Uni, la Beetham Tower est surnommée la « Howling Tower » ou « Tour hurlante » en Français. La double peau du bâtiment en tôle perforée génère un effet de sifflet dans ses trous de 8 à 12mm diamètre, donnant lieu à un son basse fréquence digne d'un film d'épouvante (2). On peut entendre ce bruit étrange généré par la tour à des centaines de mètres à la ronde ! Plusieurs procès sont en cours.

Un compte tweeter, «Angry Tower», fait prendre vie à la tour si menaçante. Ce simple fait de compte associé à une tour témoigne de la place que ces géantes ont dans la société et la façon dont on peut les voir, à la façon de Don Quichotte.



(1) <https://www.mirror.co.uk/news/uk-news/bridgewater-place-death-main-road-2878898>

(2) <https://www.youtube.com/watch?v=ShpITwqaZrA>

Le second grand impact physique qu'une tour exerce sur son environnement est son ombre. En effet, l'ombre portée d'un bâtiment de grande hauteur, si elle est assez faible à midi en période estivale sous nos latitudes, couvre au cours de la journée une zone s'étalant sur des centaines de mètres.

A Vienne, en Autriche, l'un des critères pour la validation de construction d'un gratte-ciel est que ce dernier ne doit pas projeter son ombre portée sur un même point pendant plus de 2 heures (1).

Si Vienne a le luxe de pouvoir préserver la qualité lumineuse au niveau de son sol, certaines villes, n'ont pas anticipé ce phénomène, si bien que certains endroits dans les grandes villes ne voient plus la lumière du soleil. Une piste étudiée pour résoudre cette gêne est la station Heliostat. Ce système de lentilles réfléchissantes capte la lumière du soleil sur les corniches des immeubles pour la renvoyer dans la rue en contre bas. Cette idée ingénieuse est actuellement à l'essai à la Battery Park sur la partie Sud de l'île de Manhattan (2)(voir photos ci-dessous).



Si l'ombre peut provoquer une certaine gêne pour l'environnement immédiat de la tour, la façade peut à l'inverse provoquer un trop fort ensoleillement et provoquer des situations délicates. C'est ce qui s'est passé à Londres avec le 20 Fenchurch Street (ci-contre à droite) de l'architecte Uruguayen Rafael Viñoly, dont la forme concave lui a donnée le surnom du «Talkie-Walkie». Cette morphologie originale agit cependant comme une lentille, et vient concentrer les rayons du soleil en contre bas, éblouissant les passant et provoquant des dégâts matériels : «un automobiliste a retrouvé les parties en plastique de sa Jaguar littéralement fondues après avoir garé son véhicule devant le building pendant une heure. Les promoteurs ont reconnu le problème et remboursé le propriétaire pour les dégâts causés.» (3).



Nous avons vu qu'un gratte ciel pouvait avoir de nombreuses répercussions sur son environnement immédiat. La nature de ces édifices hors-normes les emmènent au delà de la simple construction de quartier, et s'envisagent en fait à l'échelle d'une ville, les projetant finalement sur la scène internationale.

(1) *La tour et la ville, manuel de la grande hauteur* - éditions Parenthèses, Eric Firley, Julie Gimbal, 2011

(2) *Performative skyscraper tall building design now* - Balcony Press, Scott Johnson, 2014 p4

(3) https://www.liberation.fr/planete/2013/09/03/a-londres-un-gratte-ciel-accuse-de-faire-fondre-les-voitures_929068

II.3. L'impact de la tour au delà de ses environs

Avec les exemples de différentes villes de par le monde comme Paris, Londres, Francfort et New-York, nous allons nous intéresser aux places précises qu'occupent ces mastodontes au sein des villes et comment les pouvoirs publics ont géré cette nouvelle typologie de construction. Suivant des principes d'urbanismes et de zonages précis, ces constructions extraverties de nature, sont placées de manière à préserver certaines vues, certains bâtiments historiques existants, ou encore à s'intégrer au paysage.

Cadrer et préserver les vues

Les tours de grande hauteur ont un impact considérable sur le paysage d'une ville. Elles définissent avec les autres grandes structures comme les édifices religieux ou industriels, la skyline de la cité. Aussi, la législation locale intervient afin d'éviter les débordements et préserver le bien commun.

Commençons par l'étude du cas de New-York, capitale des gratte-ciel. C'est en effet dans cette ville, que la première loi d'urbanisme relative aux gratte-ciel fut mise en œuvre. En 1915, l'Equitable Building provoqua de nombreuses controverses tant ses dimensions impactaient son environnement. L'immeuble était si grand et long, qu'il privait de lumière son environnement et étouffait les rues en contre bas. L'année suivante, en 1916, les pouvoirs publics prirent les choses en main et imposèrent un système de retrait et de redents pour les hautes tours (1). De cette loi naquit un véritable style New-Yorkais caractérisé par ces nombreux retraits un peu à la manière des ziggourats anciens.



Equitable Building - 1915 -
Ernest R. Graham -
164m



Telephone building - 1926 -
Voorhees, Gmelin & Walker -
116m



New Yorker Hotel - 1929 -
Sugarman and Berger -
130m

Une autre particularité New-Yorkaise est la possibilité de transfert de «droit à la hauteur». En effet, la construction étant limitée à une hauteur maximale par parcelle, une loi de 1968 «Transfer of development rights (TDR)» modifia cette règle en autorisant une parcelle X à racheter le volume à bâtir d'une parcelle Y voisine. Ce fut le cas par exemple pour l'édification du PanAm Building de Gropius et Roth (renommé MetLife en 1992). La Pennsylvania Central Transportation Company, propriétaire du terrain sur lequel allait être érigé la tour, racheta les droits de hauteur d'une parcelle voisine : la Grand Central Station. Il s'agissait effectivement d'un bâtiment historique, incapable donc d'utiliser son volume supérieur constructible (1).

(1) *La tour et la ville, manuel de la grande hauteur* - éditions Parenthèses, Eric Firley, Julie Gimbal, 2011

La hauteur de l'édifice peut également varier avec le pourcentage de surface au rez-de-chaussée laissé à la ville, par exemple avec la création d'une place publique en front de parcelle en reculant la tour en fond de cette dernière. C'est le cas du Seagram Building de Mies Van Der Rohe, symbole du style International épuré (1).

Dans la capitale Française, l'histoire des gratte-ciel est jeune, comparée à sa voisine outre-Atlantique. Cependant, elle est dotée d'une histoire (en tant que ville, mais aussi de pays) plus vieille et d'une réglementation bien plus fournie. Depuis l'administration Haussmann de 1860-1870 et ses grands percements dans le tissu urbain Parisien, la réglementation est d'une grande rigueur sur l'homogénéité, les retraits, les alignements etc. Dans cette continuité se sont développés différents codes d'urbanisme au 20e siècle (PUD, POS, PLU...). C'est dans ce contexte que les premières tours apparurent dans la ville. Mais dans cette vieille Europe, cette vieille France, cette nouveauté fit débat.

La tour Montparnasse, seul gratte-ciel intra-muros de Paris fut sujet à de vives controverses (1) si bien que le président Valéry Giscard d'Estaing en fonction peu après l'inauguration de la tour déclara pour rassurer la population : «Paris ne sera pas un Manhattan sur Seine» (1). La « révolte nationale » selon les mots de Scott Johnson, provoquée par l'essai de Tour Montparnasse a fait prendre conscience de la nécessité de préserver le cœur historique de la ville et de choisir un autre endroit pour l'édification de gratte-ciel. Un lieu plus excentré pour y implanter le centre économique moderne indispensable à la capitale : La Défense, où plus de 150 000 travailleurs vont et viennent chaque jour (2). Cette concentration de gratte-ciel modernes alignés par un grand axe sur le cœur historique de la ville offre un face à face de 2 véritables paradigmes de l'architecture, unique !

On peut remarquer en banlieues, une nette présence de la typologie de la tour, motivée par la reconstruction et les politique «solidariste» comme les grands ensembles. Une transformation totale du centre de Paris avec des immeubles de la sorte avait été envisagée dans les années 1920 par l'architecte Charles-Édouard Jeanneret-Gris dit, Le Corbusier. (Voir illustration ci-dessous, où on reconnaît l'île de la cité en bas à droite.) On observe dans la capitale depuis 2008 un regain d'intérêt pour la grande hauteur en vue des enjeux de densification urbaine et du renouvellement urbain (1).



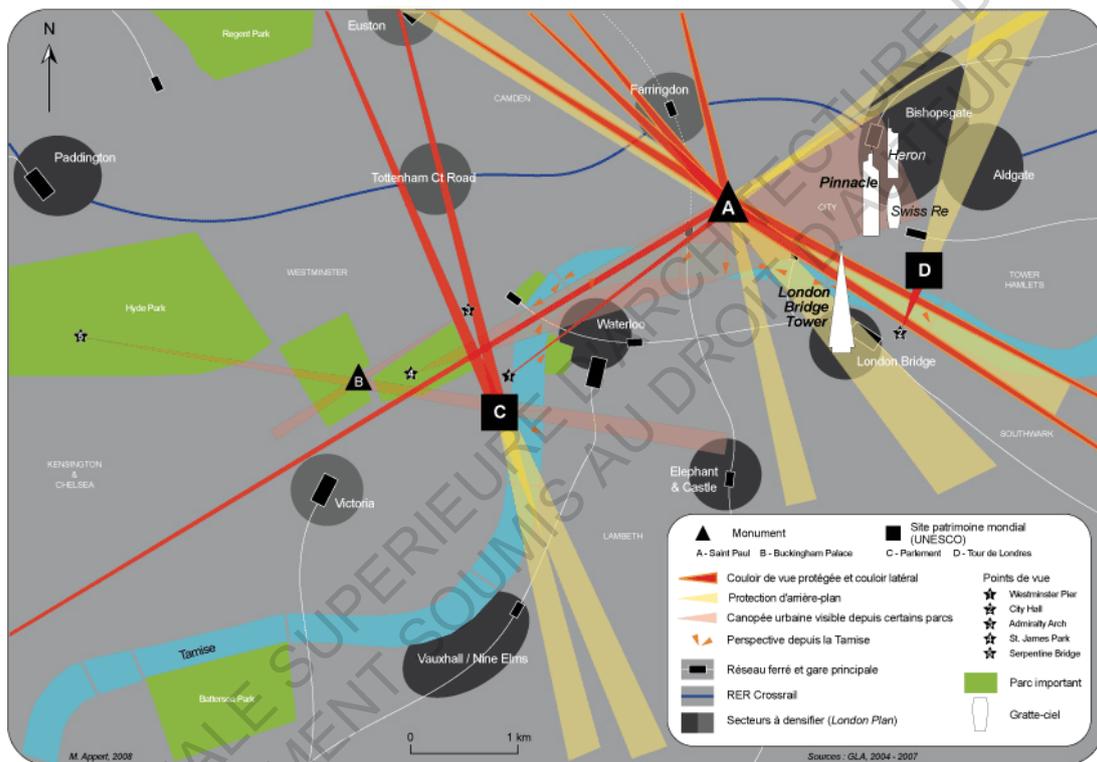
(1) *La tour et la ville, manuel de la grande hauteur* - éditions Parenthèses, Eric Firley, Julie Gimbal, 2011

(2) *Performative skyscraper tall building design now* - Balcony Press, Scott Johnson, 2014

Nos chers voisins Anglais, à Londres avaient dès 1894 posé une hauteur maximale de constructibilité à 30m dans le but de ne pas rivaliser avec la cathédrale St-Paul. Après la seconde guerre mondiale cette ville comme bien d'autres, a connu une forte pression immobilière, due aux reconstructions et opérations de promotions dans la cité, ce qui fit sauter le verrou de hauteur. Lors du zonage de la ville, 2 secteurs se sont avérés plus propices à l'érection de tours : la City et Canary Wharf.

L'aval sur les propositions de nouvelles tours sera effectif sous réserve que la zone en question soit dotée d'un solide système de transport connecté au reste de la ville. En effet, chaque projet de tour est considéré comme un nouveau boost qui va réactiver la dynamique économique au niveau local mais aussi au niveau de la ville toute entière, qui doit donc en profiter. A Londres aussi, les espaces publics au pied de la tour et dans son rez-de-chaussé sont obligatoires.

De plus, les autorités veillent à la bonne intégration du gratte-ciel dans le paysage Londonien. Il y a 26 vues protégées, des perspectives selon des points particuliers où la construction est très surveillée (voir ci-dessous). Par exemple si la future tour est proche de la Tamise, elle devra être conçue selon des teintes bleutés pour observer une cohérence visuelle (1).



A Francfort, on retrouvait également un plafond de hauteur fixé lui à 95m, c'est à dire la hauteur maximale de la Cathédrale de Francfort. Cependant comme à Londres, cette règle fût révisée dans les années 1980. Le plan d'organisation mis en place par les pouvoirs publics locaux vise une élaboration harmonieuse avec les nouveaux gratte ciel (considérés à partir de plus de 22m) et le patrimoine ancien, misant sur une composition dynamique dans le paysage de Francfort. Comme à Londres, la ville oblige les maîtres d'ouvrages à prévoir sur les 5 premiers niveaux des commerces, des services de bien commun, ou programme culturel ainsi que l'accès public du sommet de la tour pour en faire un observatoire.

Les villes tâchent de conserver une certaine harmonie avec leur patrimoine historique, mais tentent également d'assurer une certaine salubrité quant à l'impact physique des tours dans la ville. Mais au delà de l'échelle de la ville, un gratte-ciel se comprend également à une dimension plus large, au niveau national, et même international.

(1) La tour et la ville, manuel de la grande hauteur - éditions Parenthèses, Eric Firley, Julie Gimbal, 2011

Rayonnement international

Les grandes tours sont les emblèmes les plus visibles d'un essor économique. Cela se remarque premièrement dans les «grandes» capitales du monde, c'est à dire, les plus riches, notamment celles des pays industrialisés. Dans toutes ces grandes villes ont vu se développer au 20 et 21e siècle des «quartiers des affaires», dans le style américain. On peut citer bon nombre d'exemples comme La Défense de Paris, la City de Londres, le centre de Shanghai ou encore Moscou. Partout dans ces villes, les gratte-ciel se développent par grappe. Il est à noter qu'on ne trouve pas de gratte-ciel dans la capitale Américaine, la norme locale n'autorisant pas le dépassement en hauteur du capitol.

A l'intérieur d'un même pays, on peut assister à une sorte de rivalité entre plusieurs villes. La ville qui aura le plus grand gratte ciel aura le plus fort symbole d'essor économique et aura donc l'ascendant sur sa rivale. Ce fut le cas entre New-York et Chicago entre 1973 et 1974 quand les deux villes érigèrent chacune les 2 plus hautes tours du monde en 2 années consécutives : Le World Trade Center de New-York en 1973 et la Sears Tower de Chicago de 1974. Bien que plus haute d'une trentaine de mètres, la Sears Tower s'effaça devant les deux géantes de Manhattan.

On retrouve cette volonté d'affirmer cette puissance économique avec l'exemple du Lakhta Center à St-Petersbourg. Dans la ville, assiégée durant plus de 1000 jours pendant la seconde guerre mondiale, on retrouve finalement peu de vestiges de la période Soviétique. Il n'y a effectivement aucun gratte-ciel Stalinien comme les 7 sœurs de Moscou. Mais le Lakhta Center, en même temps que d'autres nombreuses infrastructures, vient bousculer la skyline de la ville, en culminant à 462m, ce qui en fait la plus haute tour d'Europe. Cette tour semble être le symbole de tout un pays, se relevant après un 20e siècle cauchemardesque.



Lakhta Center - St Petersburg - 2020 - RMJM - 462m

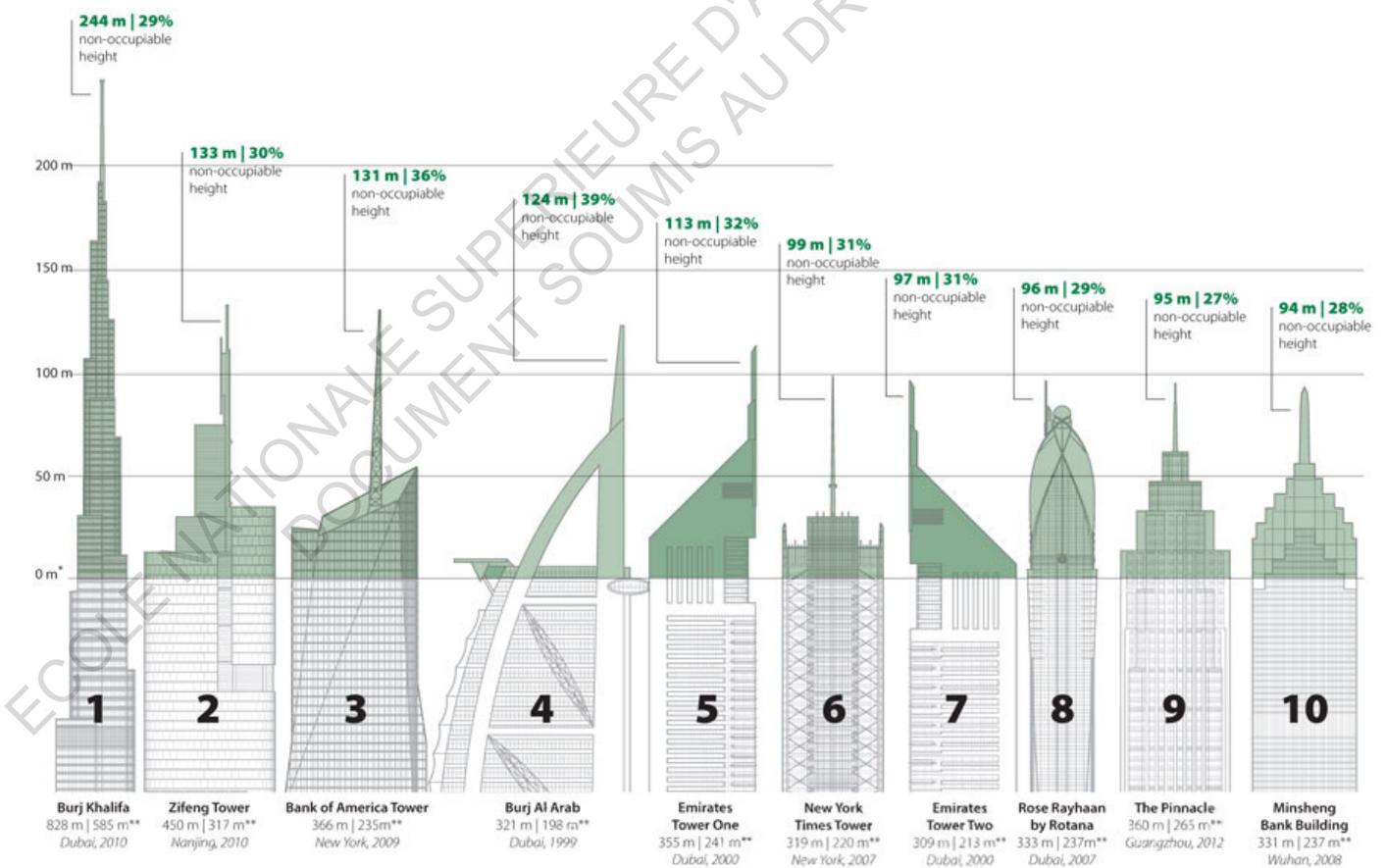
Les tours peuvent en effet être le symbole d'un pays tout entier. C'était les cas des tours jumelles du World Trade Center de New-York, marquant dans cette ville de la côte Est, les propylées de l'Amérique. Ce symbole de la toute puissance économique et commerciale était représenté à travers ces 2 mastodontes apparemment inébranlables. C'est justement pour le symbole qu'elles représentaient qu'elles furent prises pour cible lors des attentats. Mais sur ce même site de Ground Zero, la nouvelle tour «One World Trade Center» se dresse de nouveau à côté de l'empreinte de ses prédécesseurs. Sa hauteur symbolique de 1776 pieds, référence à la date de la déclaration d'indépendance des Etats-Unis, envoi un message au pays, et au monde tout entier.



D'autres part, les tours géantes ne peuvent même plus être assumées par une compagnie, mais sont maintenant soutenues par des pays. Ce sont les pays qui se portent garant de la tour qui les fera rayonner. Autrefois c'était l'affaire des entreprises capitalisantes fortunées qui avaient assez de fonds pour envisager l'édification de tours géantes, symboles de leur domination, à la manière du Rockefeller Center de Manhattan. Maintenant on remarque que ce sont de plus en plus les pays qui investissent et qui assurent le financement de ces projets pharaoniques où les coûts de ces projets se chiffrent en milliards. Cela se retrouve également dans le nom que ces tours portent. Il s'agit aujourd'hui de noms rendant hommage à leur territoire, à leur ville : Shanghai Tower, Burj Dubaï, Taïpei 10. Mais peu importe dans quelle ville, quel pays ou de quel côté de la planète se trouve l'édifice : «Partout le gratte ciel demeure essentiellement conçu pour attirer l'attention du public et pour être une expression de puissance financière»(1).

On constate à travers le monde une course à la hauteur dans les gratte-ciel. Serait-ce la démonstration ultime de la puissance d'un pays ? Du bien-être de sa population ? Ou simplement de la volonté arrogante des décideurs ? Car il faut savoir que les plus hautes constructions du monde, si elles se chiffrent en milliards, sont en fait des trompe l'œil.

Comme nous l'avons vu précédemment, le principal obstacle à l'élan de la hauteur est relatif à la circulation verticale. Il faut en effet rester capable d'acheminer, d'évacuer les personnes ou le matériel à des hauteurs toujours plus hautes. Ainsi, la place que prend le bloc de circulation au sein de la tour augmente dans les hauts étages. L'enveloppe du bâtiment se resserre autour du noyau jusqu'à prendre une place telle, qu'il ne devient plus rentable d'utiliser l'espace résiduel entre le bloc de circulation et l'enveloppe du bâtiment. Par conséquent, au delà d'une certaine hauteur, la tour n'a en réalité plus aucune fonction pratique, mais continue à grimper pour le simple fait de grimper à la plus grande hauteur possible. C'est ce qu'on appelle la hauteur de vanité.



(1) Le grand livre des gratte-ciel - Solar, David Bennett préface Norman Foster, 1997 p74

Cette hauteur de vanité ne se compte pas en dizaine de mètres, mais en centaines. Effectivement, dans le cas de la plus haute tour du monde, le Burj Khalifa de Dubaï, le dernier étage, le 163e, culmine à 584m. Or, la tour atteint la hauteur de 828m soit une hauteur de vanité de 244m où il ne se passe rien. Cela représente tout de même presque 30% de la hauteur totale de la tour. Des centaines de tonnes d'acier, de ciment, et d'autres matériaux sont utilisés dans le seul but d'atteindre une hauteur. Soit. Ce n'est pas le seul fait de cette tour en particulier, beaucoup de très hautes tours dans le monde sont elles aussi frappées d'une certaine hauteur de vanité, dans des proportions variables.

Cet emblème de «réussite» économique, ou en tout cas de puissance financière qu'est le gratte-ciel ne serait-il pas finalement le symbole parfait du paradoxe de notre civilisation ? Pensant évoluer dans un monde infini, mais pourtant bien dépendant d'une réalité qui ne nous habite plus, comme une déconnexion qui apparaît terrifiante lorsque qu'elle est mise au jour. Tous ces excès nous amènent à nous poser des questions sur la pérennité de la typologie des gratte ciel dans un monde aux ressources limitées, dans une société faisant face à de nouveaux enjeux.



ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE
DOCUMENT FOURNIS AU DESIGNER SAUF AVEUR
UNIVERSITÉ DE NANTES

tabped
BANK OF CHINA

III. La place des tours dans le futur

Maintenant que les deux premières parties ont permis de bien cerner ce qu'est et ce qu'implique un gratte-ciel, cette dernière partie va nous permettre d'interroger cette typologie de construction en la mettant en perspective avec les nouveaux enjeux contemporains. Quel est le statut des tours face aux défis auxquels notre civilisation est confrontée ? Est-ce une réponse, une solution ou bien une mauvaise piste ?

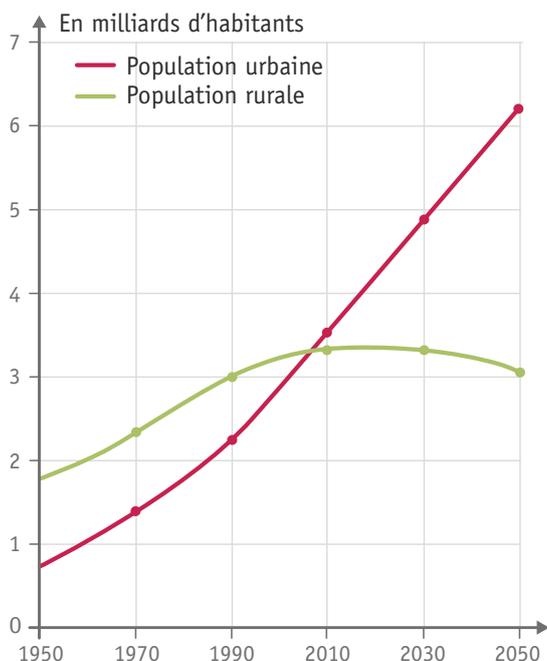
III.1. Les tours géantes face aux enjeux contemporains

Le monde tel qu'il était quand les gratte ciels sont nés il y a 150 ans n'a plus grand chose à voir avec le monde tel qu'il est aujourd'hui; comme le monde d'aujourd'hui n'aura plus grand chose à voir avec le monde dans 150 ans. Nous observons notre monde changer à une vitesse que nous avons du mal à appréhender. Bien que venu au monde en 1997, je peux déjà constater plusieurs bouleversements dans ma manière de vivre, rien qu'avec l'exemple de l'arrivée massive des smartphones dans les années 2010 qui aboutit à des changements de comportements à de nombreux niveaux ! Alors à une échelle un peu plus grande, mettons l'âge de mes parents, tellement de choses ont radicalement changé : apparition du téléphone portable et d'internet puis son implantation quasiment systématique aujourd'hui, augmentation fulgurante du nombre de véhicules aboutissant à une mobilité plus grande etc.

Malgré l'impact fondamental que ces quelques exemples ont pu avoir sur nos sociétés et nos modes de vie au cours des dernières décennies, d'autres bouleversements à venir feront sûrement passer ces derniers comme futiles ou même insignifiants.

Surpopulation et étalement urbain

Le premier défi que nous allons devoir relever est relatif à la population. En 1885, lors de l'inauguration du premier gratte-ciel, le Home Insurance Building, la population mondiale était de 1.5 milliard d'habitants. Elle fut multipliée par 2 en 75 ans (3 milliards en 1960), puis encore par 2 en moins de 40 ans (6 milliards en 1999) et demain en 2023, nous franchirons le cap des 8 milliards de citoyens du monde (1). Selon les estimations onusiennes, en 2050, l'humanité comptera plus de 9.5 milliards de personnes. La population humaine qui a mis 200 000 ans à atteindre le milliard d'individu, a augmenté de presque 7 milliards en l'espace de 150 ans. Il faudra donc assurer les besoins en logement, alimentation et bien plus encore à tous ces futurs Homo Sapiens.



En parallèle de ce phénomène, un autre événement ne s'étant jamais produit dans l'Histoire s'est produit : plus de la moitié des habitants de la planète vivent dans des villes. « Au cours du siècle et demi écoulé, la France qui était un pays à 80 % rural est devenu aux trois quarts urbanisé. »(2)(3). L'urbanisation massive commença au 19e siècle, dans le courant de la révolution industrielle. Avec les nouvelles inventions et les nouvelles machines faisant le travail de force de plusieurs centaines de personnes, les champs se vidèrent des agriculteurs, cherchant alors de nouvelles voies. En effet, un tracteur lambda d'une puissance de 60kW actuel produit l'énergie de 100 personnes (100W par individu)(4). L'exode rural s'opérant, les villes se mirent à grossir et à devenir de véritables mastodontes, emplissant des régions entières. Elles perdent d'ailleurs leur statut de ville pour devenir des mégapoles comme la ville de Los Angeles couvrant près de 1300km².

Les prévisions à court terme montrent que les villes vont continuer d'attirer de plus en plus de monde. Selon Daniel Hoornweg & Kevin Pope (5) Lagos au Nigeria pourrait attendre 88 millions d'habitants en 2100. Même si ce chiffre est à prendre avec des pincettes, il montre bien la dynamique globale du continent Africain, qui devrait être le plus peuplé d'ici à 2050, quand un habitant sur deux de la planète vivra en Afrique (6).

Mais dans le même temps, nous cherchons à préserver les espaces naturels et agricoles en limitant l'étalement urbain. On comprend dès lors que les villes vont subir une forte pression démographique et qu'il va falloir s'intéresser sur la densité de ces dernières. On peut d'ores et déjà effectuer une comparaison entre une ville où les bâtiments sont de faible hauteur et une ville plus dense où les constructions sont plus hautes : Los Angeles d'une densité de population de 3.065 hab.km² fait finalement pâle figure à côté de Manhattan et ses 25.846 habitants au km². L'étalement urbain nécessite des infrastructures routières importantes alors qu'une ville à haute densité où l'utilisation des transports en communs est privilégiée a une meilleure consommation de l'espace. Il est à noter cependant que faible hauteur ne veut pas forcément dire faible densité, comme la ville de Paris et ses 20.755 habitants au km².

On peut se poser la question de l'individualité dans de si grandes densités. Comment vivre dans une tour de 8000 personnes, dans une mégapole de plusieurs millions ? Quel rapport à la nature, si fondamental, entretient-on dans une situation pareille ?

(1) <https://www.worldometers.info/fr/population-mondiale/>

(2) 150 ans de croissance urbaine. Economie et Statistique / Economics and Statistics, INSEE, France Guérin-Pace, Denise Pumain. 1990, 60 (2), pp.203-224.

(3) <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01520526/document>

(4) <https://www.youtube.com/watch?v=Vjkq8V5rVy0&t=7253s>

(5) Socioeconomic Pathways and Regional Distribution of the World's 101 Largest Cities Global Cities Institute Working Paper No. 04 / p4, 2014

(6) <https://information.tv5monde.com/afrique/demographie-l-afrique-sera-le-continent-le-plus-peuple-en-2050-45845>

D'ailleurs, La tour peut-elle être envisagée comme ville verticale ?

Nous avons déjà parlé dans ce mémoire (cf page 28) du projet de la Sky City Tower en Chine. Ce projet de tour, abandonné depuis quelques années, envisageait effectivement la tour comme ville verticale. L'étude montrait qu'il était possible de faire vivre 55000 personnes dans la tour en autosuffisance. Mais finalement aurait-ce été bien vivable ? Quel espace vital est nécessaire ? Le phénomène de vie «encapsulée» dans des tours est elle vraiment réaliste ? Va-t-on se rapprocher dans certaines villes, du même stade que Kowloon (cf pages 30.31), les uns entassés sur les autres dans une situation difficilement soutenable ?

Par ailleurs, cet élan vertical, pourrait répondre à un autre besoin inhérent à l'augmentation de la population : l'alimentation. La culture dans des immeubles est ce qu'on appelle le «vertical farming». Il y a cependant peu d'exemples de fermes urbaines installées dans de grandes tours, mais plus des propositions et expériences que d'exemples bâtis. Cependant, certains avancent des chiffres intéressants. Comme nous l'avons déjà évoqué, 50% de la population mondiale vit dans des villes aujourd'hui, et 80% y vivra d'ici 2050 avec une augmentation de presque 1.5 milliards d'habitants dans le monde. Pour subvenir au besoin alimentaire d'une telle population, il faudrait cultiver une nouvelle surface agricole grande comme le Brésil pour nourrir tout le monde de manière raisonnable (1). Sachant qu'à notre époque tout le monde ne mange déjà pas à sa faim et que les terres arables n'apparaissent pas mais disparaissent au rythme de 10 millions d'hectares par an, soit plus que la superficie de tout le Benelux (2). Ainsi, une piste intéressante pour tenter de résoudre ce problème serait les cultures en aquaponie et aéroponie dans des complexes verticaux : un city block (pâté de maison) avec une tour de 30 étages pourrait soutenir les besoins alimentaires de 50.000 personnes, sur un rythme de 2000 calories par jour. (1)



L'agence Ilimelgo construit cette cité maraîchère, opérationnelle cette année, en Seine Saint Denis.

On note à travers le monde, comme à Denver (USA) plusieurs tentatives comme celle-ci, de produire de l'alimentation à l'intérieur des villes, favorisant le circuit court et limitant donc les déplacements entre la campagne pourvoyeuse de vivres et la ville consommatrice.

Il ne faut d'ailleurs pas perdre d'esprit que c'est bien l'agriculture et précisément le surplus alimentaire qui permet l'apparition des premières villes il y a 80 siècles. Ce fait malheureusement oublié de tous est pourtant toujours d'actualité et il y a fort à parier que si ce fondement était sapé, les villes se videraient assez vite.

(1) *The skyscraper bioclimatically considered design premier - Academy Editions, Ken Yeang, 1996 p57*

(2) <https://www.willagri.com/2018/09/14/g20-agricole-10-millions-dhectares-de-terres-agricoles-perdues-chaque-annee/>

Nous pouvons dresser un parallèle entre notre situation actuelle et la ville de Francfort. Dans les années 1920, pendant la république de Weimar, le gratte ciel était vu comme un exploit technique et un témoin du développement et de l'épanouissement de la ville, comme l'est notre perception actuelle des grandes tours. Mais après la seconde guerre mondiale et les bombardements américains, le besoin urgent de reloger les personnes fut satisfait à l'aide de tours plus hautes (1). Aujourd'hui, avec les 250 millions de réfugiés climatiques prévus par l'ONU d'ici 2050, ne nous trouverions nous pas dans une situation similaire ? Comment allons nous répondre à ce défis ?

Nous sommes donc confrontés à un double problème : Il va falloir accueillir de plus en plus de monde dans les villes, mais nous ne devons pas continuer leur expansion comme nous l'avons fait par le passé. La seule réponse possible est de bâtir la ville sur elle même, et notamment de gagner la hauteur. En effet, Selon Eric Firley et Julie Gimbal, avec la poursuite de l'urbanisation massive, la tour va perdre son statut d'exception (1). Pour David Nelson, les tours relèvent les défis de notre époque surtout ceux concernant la démographie (2).

Problématiques climatiques et énergétiques

Parallèlement aux problèmes relatifs à l'augmentation de la population, les deux autres grands challenges de notre époque seront liés au climat et à l'énergie. Faisons un point sur ces deux enjeux.

Tout d'abord, nous vivons sur une planète finie, avec des ressources finies. Sachant ce premier fait, il est alors évident que tout système (mode de vie, système économique ...), basé sur l'extraction et l'utilisation de ressources naturelles en continu, est voué à ralentir et s'effondrer. Nous avons déjà évoqué l'impact de la révolution industrielle sur notre civilisation avec notamment l'utilisation massive de machines, consommant du pétrole. Or, cet hydrocarbure, à la base de notre modèle de vie occidental mais aussi bien utile à l'ensemble des habitants de la planète va commencer à manquer. En effet, le pic pétrolier, c'est à dire le moment où 50% des réserves ont été extraites du sol et sous sol, a été franchi en 2008 pour le pétrole conventionnel (3). L'utilisation de nouvelles techniques d'extraction comme le fractionnement de roche notamment utilisé aux Etats-Unis, a permis de décaler le pic de production toutes catégories confondues de quelques années, aux horizons 2025 (3). Le vrai problème est que ce pétrole contient une quantité d'énergie très importante et très facile à utiliser et il n'existe pas d'alternative durable aussi efficace que ce dernier. En somme, le pétrole à la base de notre mode de vie actuel est en passe de manquer. Ce qui est finalement une bonne chose du point de vue du climat, la combustion de cet hydrocarbure dégageant une grande quantité de CO₂, mais une moins bonne pour nous et notre croissance, si «verte» soit elle.

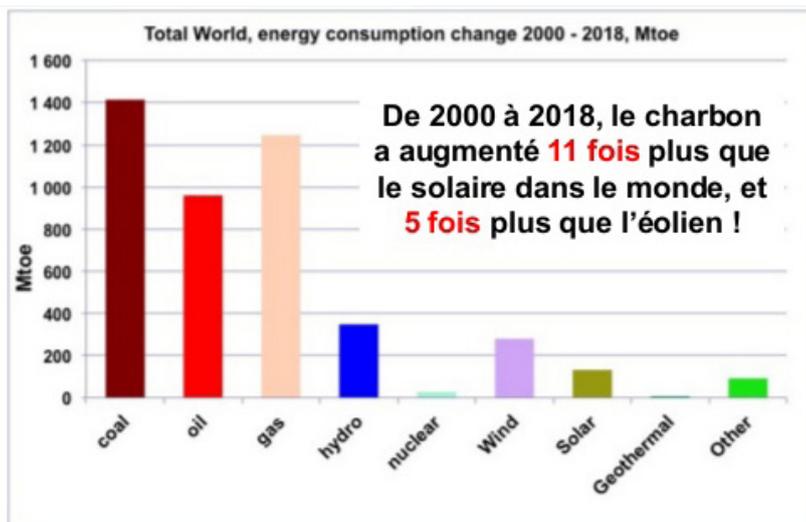
Il y a effectivement un consensus scientifique sur le fait que les activités de l'Homme modifient le climat, et notamment sur le fait que les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, Méthane etc) conduisent à une élévation de la température moyenne à la surface la planète. Avec les émissions passées, depuis le début de l'ère industrielle, nous avons déjà «signé» pour une augmentation de 1.5 degrés par rapport à la température moyenne pré-industrielle (3). L'objectif pour limiter notre impact est fixé à une hausse de +2 degrés, mais il apparaît peu probable de rester sous cette limite quand on sait que la consommation d'énergie n'a jamais cessé d'augmenter, peu importe quelle catégorie, et que l'énergie ayant le plus progressé ces 20 ou même ces 10 dernières années est, et de très loin, le charbon (voir le graphique ci-après). C'est la «pire» énergie qu'on pourrait développer face au réchauffement planétaire, cette dernière étant la plus impactante sur le rejet de CO₂ dans l'atmosphère, et c'est très précisément ce que les pays (moyenne mondiale) ont fait. Cette hausse est surtout liée à l'explosion économique de la Chine quand 2 centrales à charbon étaient inaugurées par semaine à son apogée en 2007 (4).

(1) *La tour et la ville, manuel de la grande hauteur* - éditions Parenthèses, Eric Firley, Julie Gimbal, 2011

(2) *Le grand livre des gratte-ciel* - Solar, David Bennett préface Norman Foster, 1997 avant-propos

(3) <https://www.youtube.com/watch?v=Vjkq8V5rVy0&t=7253s>

(4) <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/centrale-a-charbon>



Surplus de consommation mondiale par énergie entre 2000 et 2018. Jancovici, sur les données BP Statistical Review 2017

*Mtoe : Million Tonnes Oil Equivalent



Il n'y a cependant pas de consensus sur les impacts d'une élévation de la température planétaire de 2 degrés ou plus. En fait, un changement de cette nature et à cette vitesse (150 ans) ne s'est jamais vu dans l'histoire de la planète. Cette hausse pourrait enclencher d'autres phénomènes qui alimenteraient le système de réchauffement, comme la libération de méthane prisonnier dans le permafrost des hautes latitudes (Sibérie, Canada), ce qui est en train de se produire d'ailleurs (1). Certains scientifiques, comme Hubert Reeves (astrophysicien) craignent un emballement de ce phénomène et une élévation de la température, hors de contrôle, allant au delà des deux degrés.

Ci-contre à droite, une photographie aérienne montrant des cratères de 80m de diamètre, provoqués par la fonte du pergélisol Canadien près de la baie d'Hudson. 2008.

Pour beaucoup de monde, scientifiques inclus, les conséquences d'une augmentation de 2 degrés à l'échelle mondiale sont difficiles si ce n'est impossibles à imaginer. On peut tout de même regarder dans l'histoire de la planète, les conséquences d'un changement de quelques degrés de la température.

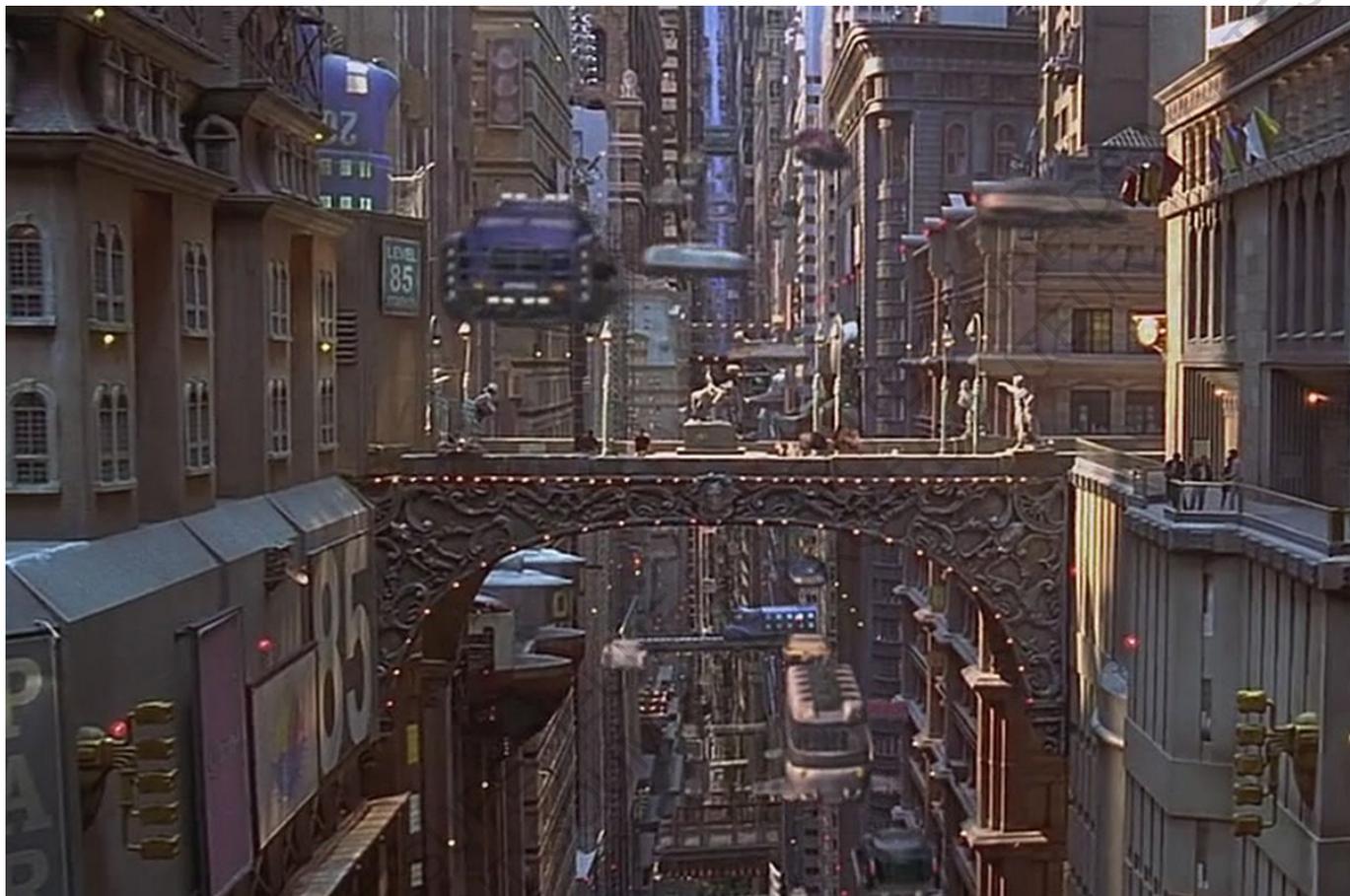
La différence de température entre la fin de la dernière période glaciaire et l'ère pré-industrielle est de l'ordre de 5 degrés. Avec ce réchauffement de 5 degrés, le niveau des océans est monté de 122 mètres (Avant, les îles anglaises pouvaient être atteintes à pied), et le climat de l'Europe de l'ouest, Sibérie pendant l'ère glaciaire, est devenu celui qu'on connaît aujourd'hui (2). Dès lors avec un changement de 1 ou 2 degrés, on peut commencer à comprendre le chiffre des 250 millions de réfugiés climatiques d'ici à 2050 selon l'ONU (3), et imaginer les conséquences physiques du changement climatique sur notre civilisation.

(1) <https://www.consoglobe.com/methane-emballement-rechauffement-cg>

(2) <https://www.youtube.com/watch?v=Vjkq8V5rVy0&t=7253s>

(3) <https://news.un.org/fr/story/2008/12/145732-climat-250-millions-de-nouveaux-deplaces-dici-2050-selon-le-hcr>

C'est aussi ici la limite du raisonnement, à tenter d'imaginer un scénario futur : tant de choses peuvent et vont se produire qu'il est bien compliqué d'anticiper l'avenir. Il faut choisir un scénario et évaluer sa probabilité de réalisation. Imaginons que la technique et l'ingénierie, tirés des avancées issues du spatial, de l'intelligence artificielle ou autre, puissent trouver des solutions assez viables pour continuer tel quel pendant un temps indéfini. Peut-on imaginer dans le futur un second niveau de vie dans les immeubles, loin du plancher des vaches, comme dans le 5e élément ? (voir illustration ci-dessous) Pourquoi pas, mais ce scénario a quand même je pense une probabilité assez faible de se réaliser.



Le cinquième élément 1997 - Luc Besson - Imagine New-York au 23e siècle, ou le miracle de la technologie a su nous affranchir de nombreux problèmes.

A mon sens, il paraît plus vraisemblable, qu'un changement radical des modes de vie ait lieu au cours de ce siècle. Ce changement sera comparable à celui qu'on connu nos aïeux grâce aux avancées techniques de la révolution industrielle, mais sans doute effectuerons nous le chemin inverse et regagnerons les champs. Compte tenu des problèmes de population, de migration massive, de contraction énergétique et donc économique, comment faire pour que cette transition des modes de vie se passe sans encombres ?

Conscient de tous ces problèmes futurs, qui ont déjà commencés à se mettre en place, il est légitime que nous nous posions la question de la place des tours de grande hauteur. Peut-elle répondre et faire face à ces nouveaux enjeux, est-ce une solution envisageable? Si tel est le cas, comment construire ces géantes le plus intelligemment, le plus efficacement possible?

III.2. Les gratte-ciel en mutation

Ces enjeux commencent à être pris en compte dans la conception des grandes tours. En effet, on constate les premiers pas de l'Odysée future avec l'apparition depuis plusieurs années de normes et labels concernant les performances énergétiques des constructions.

Labels et normes

Il existe en effet un système de notation des tours selon des labels nationaux : LEED pour les Etats-Unis, BREEAM pour le Royaume-Uni, calqué sur le LEED, HKBEAM de Hong-Kong basé sur le modèle Britannique, le label HQE Français ou encore le label Minergie pour nos voisins Suisses. Ces labels permettent de classer les tours et autres constructions selon tout un système de critère sur les performances énergétiques (1).

A Paris par exemple, le label HQE, haute qualité environnementale, est de plus en plus exigé. Le premier IGH label HQE pilote est la Tour Granite à la Défense de Christian de Portzamparc. Il existe également le Label THPE, très haute performance environnementale, visant à réduire de 20 à 30% les dépenses énergétiques. Depuis 2007 La Défense dispose du «Plan de renouveau de la Défense» visant à insérer la première génération de tours dans les standards modernes quant aux normes énergétiques (1). C'est le cas par exemple de la tour First, qui a subi une lourde restructuration.

Outre-Atlantique, la ville de New York s'est dotée de son plan «New-York 2030» visant à réduire de 50% les émissions CO2 et de consommation énergétique de la ville. Ainsi depuis 2005 et la «loi 86», les projets de gratte-ciel doivent répondre au label LEED (1). Ce label LEED, comme les autres certifications, est attribué à plusieurs niveaux en fonction d'un nombre de points reçus pour différentes stratégies mises en place afin d'obtenir le bâtiment le plus efficace possible: Certified (40-49)- Silver(50-59)- Gold(60-79)- Platinum(80+).(2)

En parallèle de ces labels, on voit se développer d'autres certificats attestant de la prise en compte des enjeux environnementaux. En 2005 la BCA, Building Construction Authority, crée le «BCA Green Mark Scheme» c'est à dire un certificat basé sur les normes internationales en matière de performance écologique, attribué sur 5 critères : La consommation en énergie et en eau, la protection de l'environnement, la qualité de l'environnement extérieur, et les innovations écologiques (1). D'autres part, ces labels ouvrent la voie à une série de mesures économiques avantageuses. Ces avantages économiques rendent plus attrayant la construction comme en témoigne les chiffres : On constate une hausse de 13% de la certification des opérations tertiaires en construction ou rénovation entre 2014 et 2015 (3). Il s'agit cependant aussi d'un outil de communication très valorisant, que les maîtrises d'ouvrages visent parfois plus que la «simple» performance environnementale.



BREEAM®



On peut constater que la majeure partie de ces labels et certifications traitent de la place de l'énergie au sein du bâtiment. En effet, c'est une part très importante dans le secteur et «sans énergie, on ne peut rien faire»(4). Nous allons donc nous intéresser maintenant à la question de l'énergie au sein d'une tour de grande hauteur.

(1) *La tour et la ville, manuel de la grande hauteur* - éditions Parenthèses, Eric Firley, Julie Gimbal, 2011

(2) <https://www.usgbc.org/leed>

(3) <https://www.batiactu.com/edito/toujours-plus-bureaux-certifies-hqe-et-breeam-france-45161.php>

(4) Apollo 13

L'énergie dans les grandes tours

Commençons par parler du coût énergétique de la construction d'un gratte-ciel. En effet, la fabrication d'un élément lambda, s'accompagne inévitablement de l'utilisation d'énergie : c'est ce qu'on appelle l'énergie grise de l'élément lambda. L'objet dont il est question ici est une construction de plusieurs centaines de mètres, pesant plusieurs dizaines de milliers de tonnes, composée de béton, d'acier et de verre (entre autre).

Faisons une étude de cas rapide pour l'énergie grise d'un célèbre gratte-ciel : L'Empire State Building. (On ne considère que les 3 matériaux «principaux» du gratte-ciel)

Energie nécessaire :

(Les données d'énergies grise des matériaux par m3 sont tirés de (1), plutôt neutre et (2) pour les données de l'ESB)

-Béton armé : 1,85 MWh pour 1m3 > 47.402 m3 utilisés dans l'ESB > donc énergie utilisée : 87.700 MWh

-Acier : 60 MWh/m3 > 7.261 m3 utilisés dans l'ESB > donc énergie utilisée : 435.700 MWh

-Verre : 15 MWh/m3 > 65 m3 utilisés dans l'ESB > donc énergie utilisée : 975 MWh

En ne considérant pas les innombrables autres postes (extraction et transport des matériaux, réseaux de gaines, tuyauteries, fournitures pour l'exploitation etc) ce qui multiplierait le résultat d'un facteur x :

-Total : 525.000 MWh pour simplement 3 composants de la tour.

Il est à noter que les valeurs sont approchées et ne donnent qu'un ordre de grandeur. 525.000 MWh est une quantité significative d'énergie, qui si elle est produite par une énergie polluante comme le charbon (820g de CO2 par kWh cf page 76) générerait 430.000 tonnes de CO2, soit plus lourd que le gratte-ciel lui même (365.000 tonnes). Ce chiffre doit sans doute se rapprocher de la réalité car à l'époque de la construction de ce bâtiment on peut considérer que les seules sources d'énergies étaient le charbon et le pétrole. Rappelons au passage que 40% de l'énergie mondiale passe dans le bâtiment (construction et exploitation)(3).

C'est un fait : les tours consomment d'avantage que les constructions de plus faible hauteur. En effet si la consommation propre à cette typologie; comme celle due aux ascenseurs, aux moteurs de pompes etc; joue un rôle, le grand problème d'une tour vis à vis de sa consommation énergétique est sa réaction par rapport aux saisons, ou plutôt la réaction qu'il faut lui apporter. En effet, une tour représente un immense volume qu'il faut maintenir à une température constante, indépendamment de celle de l'extérieur, il faut donc un apport d'énergie considérable. En règle générale dans un immeuble de grande hauteur, la consommation énergétique est la suivante : 55% pour l'air conditionné - 25% pour l'éclairage - 20% pour le reste (ascenseurs, machines d'exploitation etc)(4). Cependant la part de ces postes peut varier, comme on peut le lire dans l'ouvrage de Eric Firley et Julie Gimbal(5), où il est fait état que la consommation des ascenseurs, de l'ordre de 10-20 kWh.m².an, représente un ordre de grandeur équivalent voire supérieur au poste de l'éclairage.

Toute cette consommation énergétique pour l'exploitation du gratte-ciel dans de bonnes conditions représente le plus grand poste quant au coût économique total de l'immeuble sur son cycle de vie, basé sur 50 ans. En effet, il représente plus de 34% du coût global sur cette durée contre 33.7% pour les équipements de constructions et la construction (réparations éventuelles incluses), 14% pour la maintenance, 10% allouée à la sécurité et 8.3% pour le nettoyage (4). Il apparaît donc judicieux, même de ce point de vue économique, de s'attaquer à la consommation relative à son exploitation afin de réduire le coût du bâtiment.

Afin d'amortir ce poste énergétique, les constructeurs ont recours à différentes stratégies : conception plus efficace limitant les surfaces déperditives, choix de matériaux plus performants etc. D'autres, tâchent également de coupler à la tour des éléments générateurs d'énergie.

(1) <http://www4.ac-nancy-metz.fr/Etablissement/MOSELLE/College/clg-mermoz-yutz/technologie/Cours/S14-c/s14-c-ressources.pdf>

(2) <https://www.buildings.com/article-details/articleid/3180/title/the-empire-state-building-an-innovative-skyscraper>

(3) *Performative skyscraper tall building design now* - Balcony Press, Scott Johnson, 2014 p71

(4) *The skyscraper bioclimatically considered design premier* - Academy Editions, Ken Yeang, 1996 p208

(5) *La tour et la ville, manuel de la grande hauteur* - éditions Parenthèses, Eric Firley, Julie Gimbal, 2011 p252

L'apport éolien

Une solution développée pour générer de l'énergie au sein des tours est la turbine à vent, plus connue sous le nom d'éolienne. En effet, de plus en plus de nouveaux gratte-ciel disposent de plusieurs turbines placées sur les superstructures car il paraît plutôt intéressant de tirer partie du vent s'écoulant autour et au dessus de l'immeuble.

C'est le cas du Strata building à Londres, ci contre à droite, disposant de 3 turbines de 9 m de diamètre générant 8% des besoins de l'immeuble. Cependant d'après plusieurs sources (1)(2), les turbines ayant coûté 1.5 millions de livres ne tournent presque jamais.



Un autre exemple est la Pearl River Tower en Chine (ci-contre à gauche), utilisant la courbure de sa façade pour rediriger le vent incident vers des turbines placées dans l'espace entre deux parties de l'immeuble. Cette tour voulue comme la plus respectueuse de l'environnement dispose également de panneaux solaires faisant consommer 60% d'énergie en moins que ses homologues de même taille ne prenant pas en compte ces énergies (3).

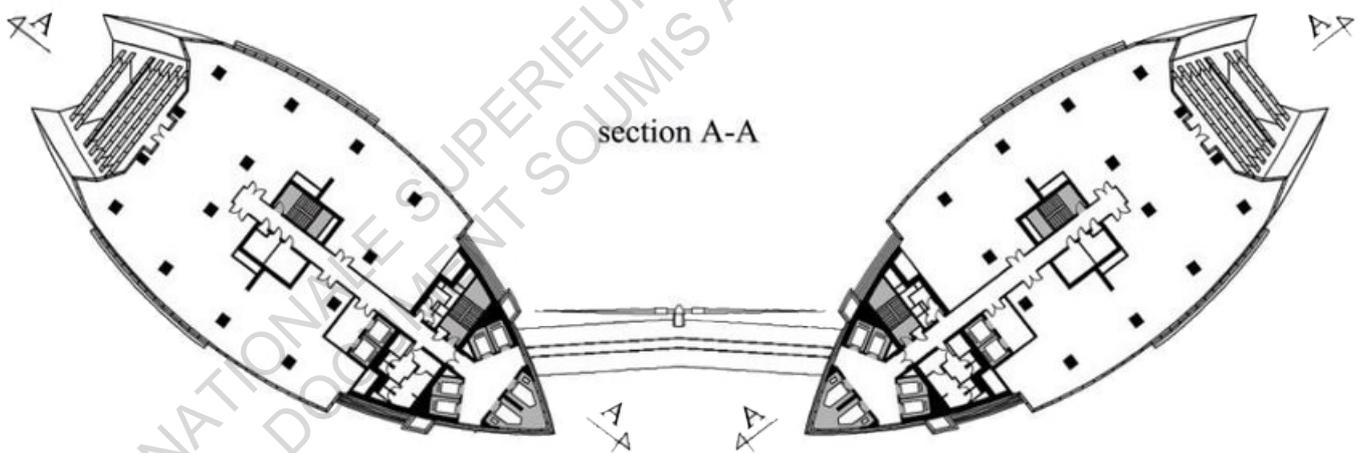
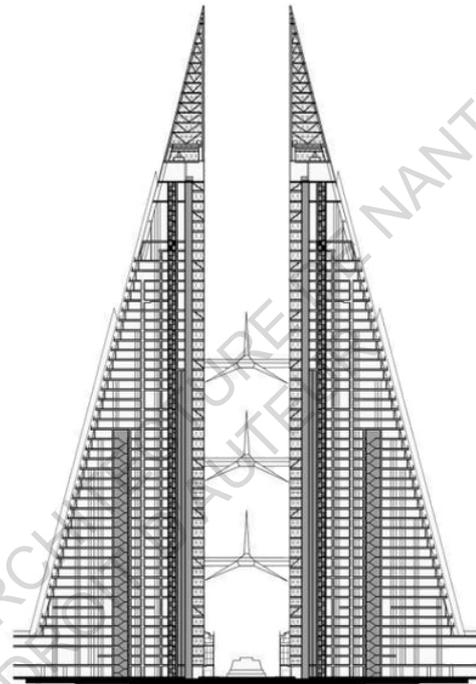
L'éolienne ci dessus est une éolienne dite de Savonius, installée dans la Pearl River Tower. Si elle présente l'avantage de prendre moins de place puisque agissant selon un axe vertical, elle est cependant moins efficace qu'une éolienne à axe horizontal.

(1) <https://www.insiderlondon.com/blog/when-london-buildings-go-wrong/>

(2) <http://www.urban75.org/blog/the-rarely-spinning-turbines-of-the-strata-tower-south-london/>

(3) *Performative skyscraper tall building design now* - Balcony Press, Scott Johnson, 2014

Un autre exemple montrant cette tendance est le World Trade Center de Bahrein où 3 turbines de 29m de diamètre génèrent 225kW chacune (puissance maximale théorique). Elles sont placées de telle sorte à ce que les façades incurvées des deux tours jumelles provoquent un effet Venturi (accélération du flux suite à une contraction de l'espace de circulation). L'objectif est de produire 1100 MW par an (1).



Si cela est une bonne idée à première vue, on peut quand même émettre quelques réserves. Premièrement, ces éoliennes fixes ne tournent pas toujours quand bien même il y a du vent. L'exemple du WTC de Bahrein et du Strata Building y sont soumis : pas de changement azimutal possible pour les turbines, elles ne peuvent donc tourner que quand le vent souffle dans la bonne direction.

Ensuite, ces éoliennes fixées sur l'immeuble, en transmettant leurs vibrations à ce dernier, et vont provoquer des nuisances structurelles. Ces nuisances seront plus ou moins importantes et localisées en fonction de la fréquence propre du bâtiment, et de celles des turbines. Dans tous les cas, elles provoqueront un vieillissement accéléré de l'équipement ou de la structure toute entière (2).

(1) *Performative skyscraper tall building design now* - Balcony Press, Scott Johnson, 2014

(2) UET Vent ENSAN

Enfin l'accélération par effet Venturi comme sur le World Trade Center de Bahrein ne produit qu'un facteur 2 pour le potentiel éolien (1). C'est toujours une accélération, mais si la puissance potentielle récupérée dépend de la vitesse du vent au facteur cube elle dépend aussi de l'aire balayée par les pales :

$$P = \frac{(RohAir.AireBalayée.Vitessevent^3.Cp(Coefficient\ efficacité\ théorisé\ au\ maximum\ de\ 0.59))}{2}$$

Ainsi, il vaut mieux de plus grandes installations non associées à l'immeuble plutôt qu'y intégrer des plus petites. On peut voir dans ces tentatives de génération d'énergie à partir de l'éolien plus une image très positive véhiculée par ces éoliennes qu'une véritable source d'énergie. Mais cela reste toujours une quantité d'énergie «propre» qu'on générera.

Et le solaire ?

L'autre énergie renouvelable intéressante dans le domaine des gratte-ciel est le solaire. En effet les façades des grandes tours sont autant de surfaces susceptibles d'accueillir des cellules photovoltaïques. L'énergie solaire abonde gratuitement et déverse sur Terre autant d'énergie chaque heure (130 millions de GWh) que l'humanité n'en consomme en une année (100 millions de GWh)(2). Il est bien-sûr utopique d'imaginer pouvoir capter la totalité de cette énergie.

Cependant les panneaux solaires n'ont pas la cote dans le milieu des gratte-ciel. En effet plusieurs facteurs viennent freiner le développement de cette technologie. Coût élevé du au manque du silicone utilisé, doutes sur les technologies : les investisseurs peu rassurés ne se risquent pas de faire le pari d'une nouvelle technologie sur de si grands projets que sont les gratte ciels. Toujours est-il qu'il existe plusieurs exemples de grandes tours mettant en œuvre de grandes surfaces captant l'énergie solaire.

Cooperative Insurance Society (CIS) Manchester
1962 - Gordon Tait GS Hay



Ce bâtiment haut de 118m a été le sujet d'une grande réhabilitation en 2006. Les façades Est Sud et Ouest sont couvertes de 724.480 panneaux photovoltaïques faisant de cet immeuble le plus grand bâtiment «panneau solaire» d'Europe (3).

(1) UET Vent ENSAN

(2) <https://news.dualsun.com/actualite/quel-est-le-potentiel-de-lenergie-solaire/>

(3) Performative skyscraper tall building design now - Balcony Press, Scott Johnson, 2014

La Heron Tower à Londres (voir ci-dessous) est une tour de 46 étages, dont le noyau de service placé au sud du bâtiment permet d'être le support de 3000 m² de panneaux solaires. Cette surface permet la génération de 92 MW par an (10.5 kWh) soit 2.5% de la consommation électrique annuelle du bâtiment et empêcherait au passage le rejet de 850 tonnes de CO₂ par an dans l'atmosphère (1).

Ce chiffre, après vérification paraît très élevé. Premièrement, il dépend de l'énergie primaire avec laquelle aurait été générée ces 92 MW autrement. Pour le charbon, dont le kWh génère 820g de CO₂ (valeur médiane émise par le GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), la masse de CO₂ évitée est de 75 tonnes, bien loin des 850 tonnes énoncées par Scott Johnson. Si l'énergie utilisée avait été le nucléaire, dont le kWh dégage 12g de CO₂ (donnée du GIEC ici aussi), la masse de CO₂ évitée aurait été de l'ordre de la tonne sur l'année. En fait pour éviter de relâcher 850 tonnes de CO₂ avec une production de 92MW, il faudrait que ces 92MW soient produits avec une énergie émettant 9.239g de CO₂ par kWh, or une telle énergie n'existe pas. (Heureusement ?!)



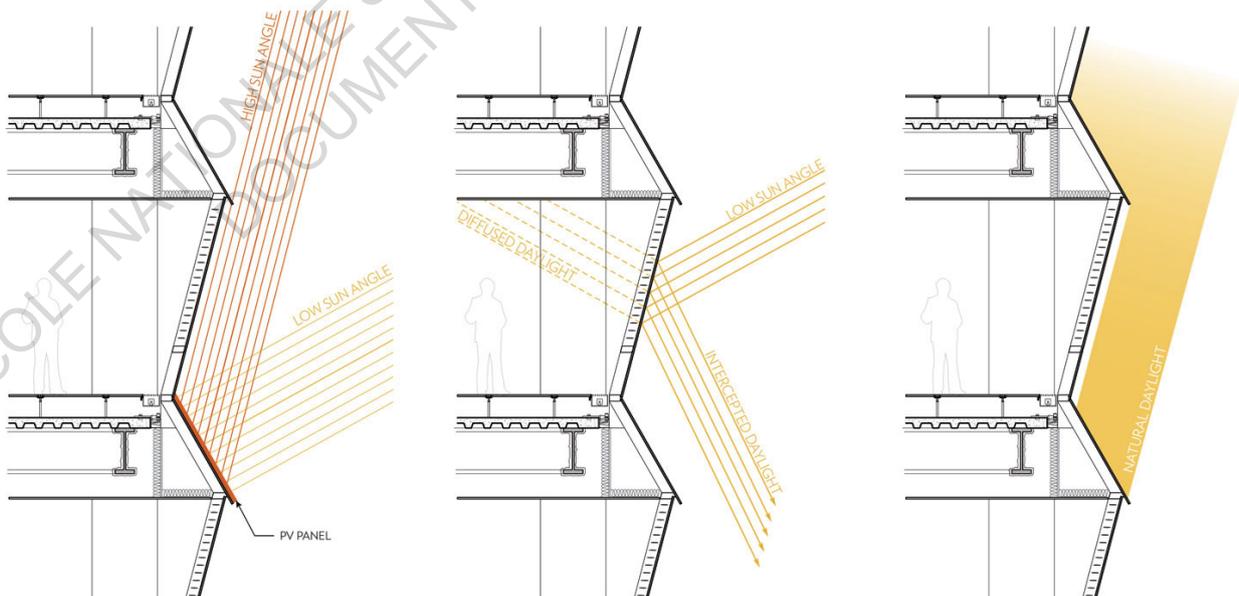
Cette préoccupation sur l'énergie consommée ou économisée nous permet de nous intéresser pour un moment à la question de l'énergie grise des panneaux solaires. Comme nous l'avons déjà évoqué, tout élément construit porte l'empreinte de son énergie grise, l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication. Cependant, une unité productrice d'énergie peut «rembourser» cette énergie grise, c'est ce qu'on appelle le TRE : Temps de Retour d'Énergie. En moyenne un panneau photovoltaïque a un TRE d'environ 10 ans, variant selon les modèles et générations de cellules mais aussi variant selon l'emplacement du panneau par rapport au soleil (2). D'autre part, et contrairement à ce qu'on peut parfois lire sur les panneaux solaires, leur construction ne nécessite pas de «terres rares» et son recyclables à 95% : seules les parties en élastomère assurant l'étanchéité ne peuvent pas être recyclées.

(1) *Performative skyscraper tall building design now* - Balcony Press, Scott Johnson, 2014

(2) *UET Energies ENSAN*

L'angle incident des rayons du soleil par rapport au panneau photovoltaïque va en effet jouer un grand rôle sur la capacité de production électrique de ce dernier. De la même manière que les rayons du soleil donnent moins de puissance dans les hautes latitudes de l'hémisphère car étalés sur une plus grande surface.

Ce paramètre peut-être pris en compte dans l'intégration de panneaux solaires dans les tours de grande hauteur. C'est le cas de la tour FKI à Séoul, de l'agence Chang-Jo Architects, achevée en 2013. (voir ci-dessous) dont le dessin de façade en crenelure intègre des panneaux solaires. Les parties zénithales de la façade sont orientées de 30 degrés au Soleil par rapport à la verticale de façon à maximiser l'apport solaire sur les cellules productrices tout en permettant un éclairage diffus de l'environnement intérieur via les parties inférieures dirigées vers le sol (1).



(1) <https://urbannext.net/fki-tower/>

Dans un autre registre, il existe des «panneaux à visées énergétiques» à base de flore marine. En effet, il s'agit d'algues encapsulées dans des panneaux, se développant grâce à l'apport solaire. Elles permettent par la suite la production d'huiles et autres ressources servant pour le chauffage, l'électricité ou même la dépollution des villes. L'agence X-TU Architectes et le laboratoire GEPEA de l'université de Nantes lancent d'ailleurs les premiers prototypes, qui fonctionnent (1).



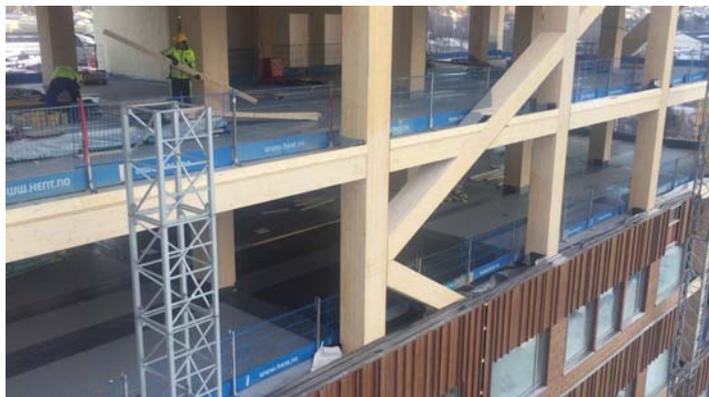
A gauche : Prototype sur la façade d'une tour du CSTB de Marne-La-Vallée, premier pas vers l'application à grande échelle ?
A droite : Bâtiment lauréat de l'appel à projet «Réinventer Paris» qui présentera plusieurs centaines de mètres carrés de «biofaçades» dans le 13e arrondissement de la capitale. (Crédit : XTU Architects)

Et la construction bois ?

Une autre vague dans le couple architecture-écologie est la construction en bois. En effet, ce matériau renouvelable grandit grâce au CO₂ qu'il capture. En règle en générale il est admis que 1m cube de bois a stocké 1 tonne de CO₂. Ainsi, un immeuble entièrement en bois (ou presque) dans une ville peut représenter un «puit de carbone», c'est à dire un immeuble ayant plus stocké du carbone représentant donc une réserve, n'ayant pas été émise dans l'atmosphère, à l'opposé du béton par exemple. On pourrait donc se pencher sur la construction en hauteur avec le bois, pour diminuer le coût de l'énergie grise du bâtiment.

Pour le moment, la plus haute tour en bois est le Mjøstårnet à Brumunddal en Norvège, haute de 85.4 mètres pour 18 étages. Par ailleurs, si le bois ne nécessite pas d'utilisation massive d'énergie pour sa mise en place, sa transformation et son traitement éventuel, contre les intempéries ou les insectes par exemple, présente un aspect peu «éco-responsable» vis-à-vis des produits chimiques utilisés ou de l'énergie dépensée.

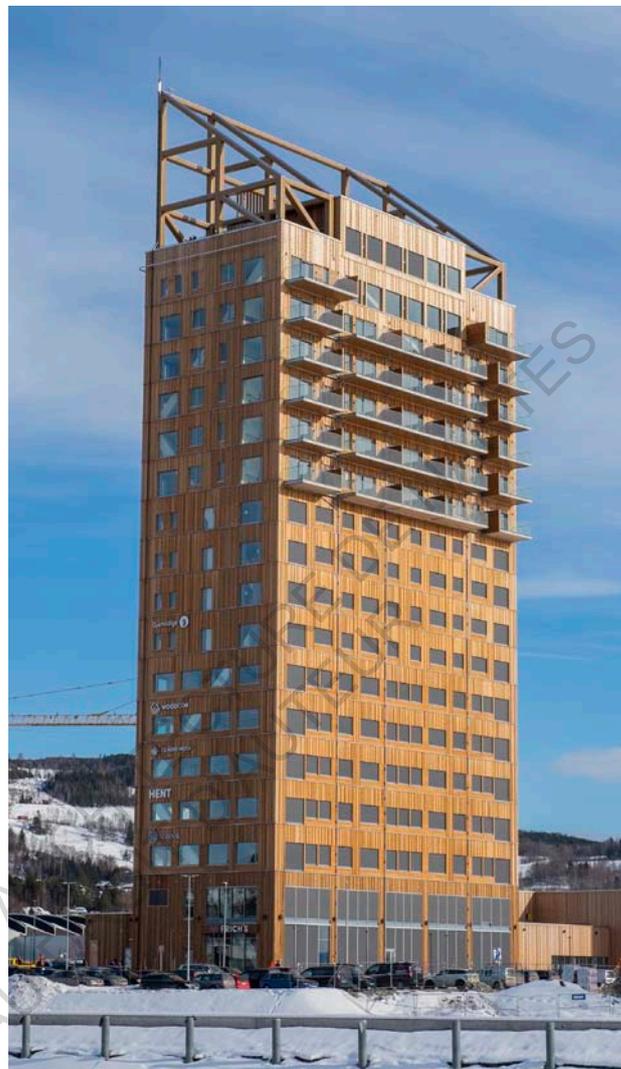
(1) *Les 101 mots des tours à l'usage de tous - Archibooks, Philippe Chaix, 2014*



La tour Monosberg - 2019 - Voll Arkitekter

Cette tour illustre tout le savoir faire de la construction bois en associant plusieurs techniques spécifiques de ce matériau. Le «Lamellé collé», connu pour ses grandes capacités de portance, est utilisé avec le CLT (Cross Laminated Timber) pour les parties structurantes de l'édifice, associées à des planchers bois. Sur ces planchers, il y a tout de même une couche de 50mm de béton, pour parer aux problèmes acoustiques, qui est une grande faiblesse du bois(1). Il est à noter également que les 6 derniers planchers sont composés de béton, afin «d'atteindre le comportement dynamique souhaité en période de vents forts»(3).

Cette tour pourrait être la première à ouvrir la voie à une nouvelle génération de gratte-ciel, qu'on peut appeler «plyscrapers»(2). (Référence à Plywood, signifiant Contre plaqué)



De l'autre côté de la planète à Tokyo, est envisagé un projet de véritables tours géantes en bois. Ces tours, imaginées pour atteindre les 350 mètres de haut, sont imaginées par l'entreprise Sumitomo Forestry, spécialiste du bois au Japon, fondé en 1691(4).

Cependant, selon un des enseignants ingénieurs au CSTB de Nantes que j'ai eu l'occasion de suivre lors de l'UET Vent à l'ENSAN, les premiers retours qu'on aurait sur les grandes constructions élancées en bois seraient que ces dernières bougent trop. Le bois, beaucoup moins rigide que l'acier ou le béton, engendrerait des oscillations trop importantes pour être permettre une vie normale dans la grande hauteur.

(1) <https://guinnessworldrecords.com/world-records/79569-tallest-wooden-building/>

(2) <https://rencontres-woodrise.ch/la-revolution-des-gratte-ciel-en-bois-est-elle-arrivee/>

(3) <https://www.skyscrapercenter.com/building/mjostarnet/26866>

(4) <https://www.batiactu.com/edito/un-gratte-ciel-bois-plus-haut-que-tour-eiffel-a-tokyo-52146.php>

On a pu voir avec les différents thèmes abordés, que la relation entre l'architecture, particulièrement celle des grandes tours, et les préoccupations environnementales, si elles sont louables, relèvent parfois du green-washing plus que du réel intérêt écologique. Cependant, il existe de véritables théories architecturales consacrées au couple grande-tour - nature, pouvant être source d'inspiration pour les constructions de demain.

III.3. La conception bio-climatique : le salut des grandes constructions ?

Dans le monde de l'architecture depuis quelques années, on assiste à une augmentation de constructions conçues selon des principes «bio - climatiques». Dans le domaine des tours de grande hauteur, c'est l'architecte Malaysien Ken Yeang qui fut d'un des pionniers. C'est dans les années 1990 que le principe de conception bioclimatique apparut dans le monde des constructions de grande hauteur. Cette nouvelle idéologie de conception architecturale (orientation du bâtiment, ventilation naturelle, typologie de tours non monolithiques etc) tend à rendre les grandes tours plus communicatives avec leurs environnement, ce qui n'est pas le cas pour la majorité des tours existantes.

En effet, l'une des principales critiques qu'on peut faire d'une tour de grande hauteur «traditionnelle» est qu'elle est totalement hermétique à son environnement. La Sears Tower par exemple est qualifiée de «boîte étanche de 443m de haut, hermétiquement isolée du reste du monde» par David Bennett (1). De fait, en hiver on doit chauffer énormément et en été, refroidir énormément. De plus, cet isolement nécessite la mise en place de machines assurant le renouvellement de l'air et l'évacuation de l'air vicié ainsi que le maintien de la température et du taux d'humidité. Cette machinerie prend d'ailleurs une place conséquente au sein d'un gratte ciel. En effet, toujours avec l'exemple de la Sears Tower, on retrouve au 29e étage 5 échangeurs thermiques : 3 de 5000 tonnes et 2 de 1800 tonnes ainsi que des tours de refroidissement hautes de 3 étages entre les 106e et 109e étage. Cette machinerie consomme donc un volume important à différents endroits de la tour (1). Cette «boîte hermétique» est également critiquée chez Scott Johnson, où l'auteur fait page 19 de son livre (2) une référence à la thermodynamique et à l'inéluctable mort thermique d'un système isolé, à l'image d'un gratte-ciel.

Relation au climat

Ce que prône la conception bio-climatique, c'est avant tout la communication avec l'environnement, et l'adaptation à son climat. En effet, l'Histoire s'explique par un climat, dicté par une géographie. Et c'est le climat endémique, qui a façonné les modes de vie des habitants d'un lieu et façonné son paysage. Ainsi, adapter le bâtiment au climat de la localité donne un design particulier, justifié(3). On retrouve cette prise de conscience chez Eric Firley et Julie Gimbal (4) : « Alors que la conception des bâtiments de faible hauteur, du fait de son lien historique avec l'architecture vernaculaire, a presque toujours réagi au climat, la conception des tours a débuté sa propre histoire autour des seules prouesses techniques». Il faut donc revoir la manière de faire les grandes tours, et pas seulement d'y ajouter des équipements techniques et technologiques sophistiqués : la conception d'une tour commence d'abord par son emplacement et sa configuration spatiale.

(1) *Le grand livre des gratte-ciel - Solar*, David Bennett préface Norman Foster, 1997

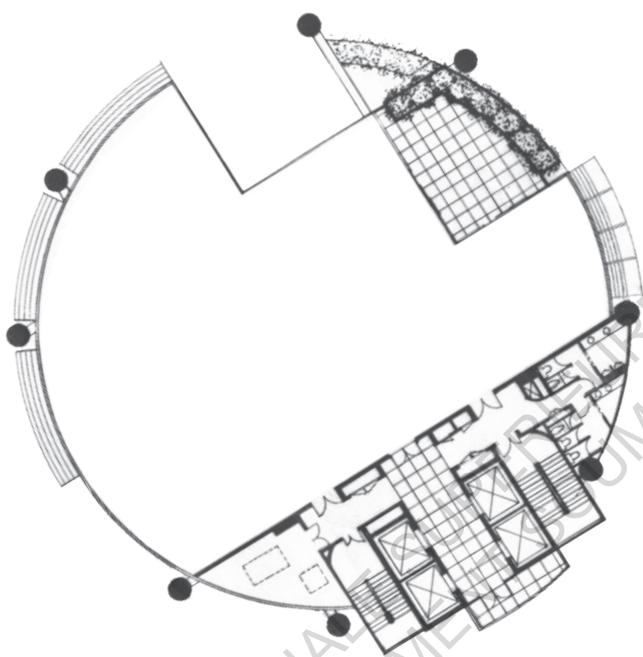
(2) *Performative skyscraper tall building design now* - Balcony Press, Scott Johnson, 2014 p19

(3) *The skyscraper bioclimatically considered design premier* - Academy Editions, Ken Yeang, 1996 p21

(4) *La tour et la ville, manuel de la grande hauteur* - éditions Parenthèses, Eric Firley, Julie Gimbal, 2011 p252

Premièrement, cette prise en compte du climat commence lors de la conception, avec notamment le placement du noyau de circulation. Nous avons vu que cet élément était constitutif d'un gratte-ciel mais son emplacement au sein de la tour peut présenter des avantages s'il est placé à un endroit particulier. Suite à l'étude du climat local d'un site dédié à la construction d'une tour, on peut dresser les profils des impacts climatiques auxquels la tour devra faire face. Il s'agit par exemple de fort ensoleillement sur la face sud, des vents froids venant de l'est etc. Ainsi, on peut placer le noyau de circulation de telle façon à ce qu'il agisse comme «bouclier» face aux sollicitations de l'environnement extérieur. C'est le cas de la tour Menara Mesiniaga de Ken Yeang, qui représente un manifesto architectural de la théorie de la conception bioclimatique appliquée à la grande hauteur. En effet, l'architecte a placé le bloc de circulation sur la face sud du bâtiment, protégeant ce dernier des fortes chaleurs du climat équatorial Malaisien : le noyau agit comme espace tampon et préserve les espaces de travail grâce à sa grande inertie. Si ce principe s'appliquait sous nos latitudes, il serait plus intelligent de privilégier des ouvertures au sud permettant de capter l'énergie solaire et d'obtenir dans le même temps un apport lumineux important en hiver.

Par ailleurs, le placement du noyau de circulation en périphérie de la tour permet une grande flexibilité sur l'utilisation de l'espace dans l'étage qui n'est pas obstrué par le bloc, comme cela peut être le cas dans d'autres grandes tours.



Ci-dessus, un plan d'étage courant de la tour Menara Mesiniaga (ci-contre à droite). Le bloc de circulation au Sud-Est protège le reste de l'espace des fortes chaleurs du climat Malaisien.

D'autre part, une remarque percutante est avancée par Ken Yang (1) : «Pourquoi les façades d'un gratte ciel sont souvent identiques alors que le contexte climatique ne l'est pas ?». En effet chaque façade est soumise à différents assauts de son environnement, vis-à-vis des vents dominants, ou de la chaleur qui provoquera d'ailleurs des dilatations thermiques sur la structure de l'édifice. On comprend tout à fait ce qu'il veut dire quand on observe l'aspect extérieur de la Menara Mesiniaga où aucune façade de cette tour ne ressemble à une autre. On peut voir sur la photo ci dessus à gauche, différents éléments présents à certains endroits et absents à d'autres comme les brises Soleil. Ce bâtiment à l'aspect plutôt High-Tech, renvoi également au siège qu'elle habite, celui de la compagnie IBM.



(1) *The skyscraper bioclimatically considered design premier - Academy Editions, Ken Yeang, 1996 p18*

Double peau et façade intelligente

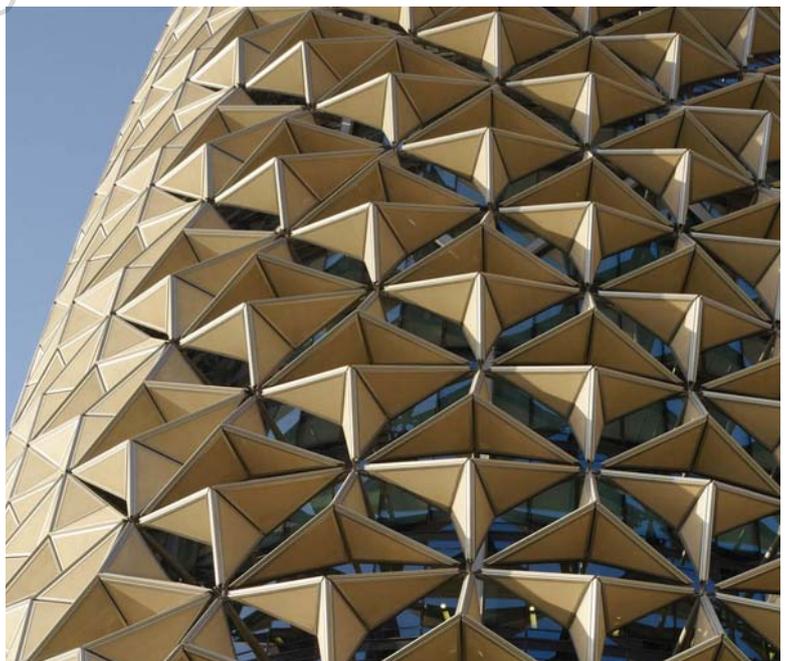
Le principe de communication avec l'environnement se poursuit sur les façades. En effet, la «peau» d'un gratte-ciel bioclimatique devrait plus être vu plus comme un tamis, poreux, plutôt qu'une enveloppe parfaitement close et hermétique.

L'institut du monde arabe (1987) - Jean Nouvel

La façade du bâtiment est considérée comme la première «peau intelligente» d'un édifice : des capteurs évaluent l'ensoleillement extérieur et commandent l'ouverture ou la fermeture d'iris métalliques, permettant un éclairage naturel modulaire, tout en rappelant le moucharabieh arabe.



On peut retrouver cette application de façades intelligentes ingénierisées dans les tours de grande hauteur, comme les Al Bahr Towers de Abu Dhabi. Ce système d'ombrage par « fleurs de soleil » permet à ces grandes tours jumelles de se protéger des ardeurs du désert Arabique, assujetti à un très fort ensoleillement. Ces édifices ont été achevés en 2018.



Si les façades peuvent jouer le rôle de filtre solaire, elles peuvent également jouer le rôle de régulateur thermique. En effet, c'est le cas du système de double peau, employé par plusieurs grandes tours se revendiquant de la conception bio-climatique. Le principe de double peau consiste en un espace tampon entre deux parois, qui constituent finalement deux façades distinctes, créant un espace non chauffé où l'air peut circuler librement. C'est le principe même de l'isolation : l'air étant un très bon isolant, on cherche à l'utiliser afin d'amortir les écarts entre l'intérieur et l'extérieur. Ce principe de double peau est d'ailleurs la technique d'isolation utilisée dans le village le plus froid du monde, Oymyakon en Sibérie, qui voit ses habitations vernaculaires parées d'une enceinte périphérique qui joue le rôle d'isolation(1).

Shanghai Tower
(2016) - 602m
Gensler & Tongji Architectural Design



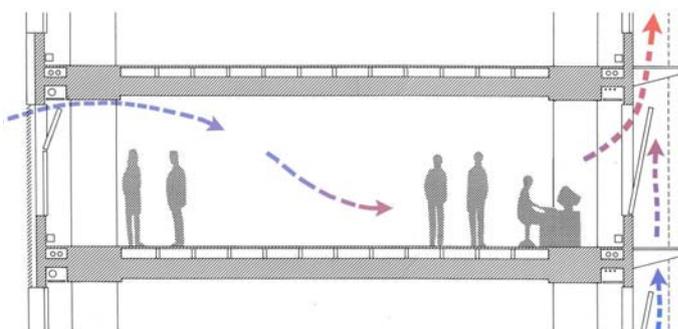
La seconde plus haute tour de monde, déjà évoquée, dispose en effet d'une double peau permettant la création de grands atriums sur toute la hauteur de la tour, permettant de faire varier les «paysages» qu'on peut rencontrer à l'intérieur du gratte-ciel.

Ventilation naturelle

Un autre pilier de la conception bio-climatique est la ventilation naturelle : pourquoi dépenser de l'énergie en employant des machines quand un simple différentiel de pression peut faire le travail tout seul ? Le but de la ventilation est de renouveler l'air à l'intérieur de l'immeuble en maintenant des taux de gaz acceptables. Le dioxygène O₂ ne doit pas diminuer de plus de 3 à 4% par rapport à sa valeur nominale de 21% dans l'atmosphère au niveau de la mer. Le dioxyde de carbone CO₂ lui ne doit pas dépasser les 2 à 3% d'une atmosphère contrôlée, sa valeur nominale étant de 0.02 à 0.04 %(2). La ventilation doit également assurer le confort thermique des occupants, et cela peut passer par un refroidissement structurel. En effet, une ventilation de la structure permet d'évacuer plus rapidement la chaleur contenue dans cette dernière, évitant le déphasage thermique et donc un potentiel phénomène de surchauffe, notamment la nuit. Pour le GSW Headquarters à Berlin, la technique de ventilation naturelle a permis la réduction du besoin de ventilation mécanique de 70% (3).



GSW Headquarters
(1999) - 81.5m
Sauerbruch Hutton



Principe de ventilation naturelle du GSW HQ de Berlin

(1) <https://www.youtube.com/watch?v=yIpuGUWGdSs>

(2) *The skyscraper bioclimatically considered design premier* - Academy Editions, Ken Yeang, 1996 p128

(3) *Performative skyscraper tall building design now* - Balcony Press, Scott Johnson, 2014

Flore verticale

Le dernier grand principe de la conception bio-climatique est le «vertical landscape», c'est à dire le travail du paysage vertical. Il est idée ici de faire d'une tour un « village interactif avec son environnement, plus qu'une simple superposition d'étages » (1) où l'on peut accéder à différents espaces extérieurs sur lesquels prennent place de la végétation. Ces «skycourts» (qu'on pourrait traduire par «cours célestes» ?), permettent de proposer aux occupants de la tour un lien avec le «monde extérieur», notamment par le fait que ces espaces extérieurs changent au fil des saisons, permettant de rythmer la vie au sein du gratte-ciel. Ces espaces sont voulus comme les plus végétalisés possibles, permettant de contrer la masse inorganique d'un gratte-ciel (si ce dernier n'est pas en bois). L'idée de fond est de retrouver un maximum de repères que nous avons dans les paysages au sol (herbe, buissons et autres arbres), dans les tours, offrant donc une sorte de continuité entre l'environnement de la tour et cette dernière. De plus, cette végétalisation permet de donner de la rugosité à la façade vis-à-vis du vent : les perturbations causées par la tour seront ainsi plus éparées comparativement à une façade lisse qui aurait canalisé ces effets perturbateurs.



Ci-dessus de gauche à droite : Deux tours imaginées par Ken Yeang, et à droite la tour végétale de Nantes, par l'architecte Edouard François.

Cependant, la végétalisation de la hauteur n'est pas exempte de critiques. Cette végétation a besoin d'être irriguée et va consommer de l'eau qui selon les localités, peut venir à manquer en cas de sécheresse. Par la suite, il faut prendre en compte le drainage de cette eau après irrigation pour ne pas qu'elle s'infiltré dans de potentielles failles dans l'immeuble et provoquer des dégâts. De plus cette flore ne va évidemment pas pousser à même le sol mais dans de larges bacs ou volumes de terre. Cependant, cette terre pèse lourd, environ 1.3 tonne par m³, ce qui nécessite des besoins structurels supplémentaires, et donc plus d'énergie dépensée.

Finalement, cette végétalisation, un peu à la manière des éoliennes, si elle est de bonne intention, peut parfois vite se retourner contre les principes qu'elle défend, et être plus un outil de communication et une façade validée par le greenwashing ambient où quand un bâtiment est «vert» c'est forcément «bien».

(1) *The skyscraper bioclimatically considered design premier* - Academy Editions, Ken Yeang, 1996 p84

(2) <https://www.epfl.ch/labs/echo/wp-content/uploads/2018/07/02-Propriets-de-base-du-sol-et-de-la-phase-liquide-1.pdf>

La théorie bio-climatique présente donc des fondements très intéressants à différents niveaux, tant sur l'étape de conception que d'exploitation pour le confort des occupants, tout en soulignant l'importance du rapport qu'entretien une construction avec son environnement et son climat.

Ainsi, face à la somme des enjeux modernes, il semblerait qu'un gratte-ciel puisse être dans une certaine mesure, une réponse à l'augmentation de la population urbaine et ses besoins, quand il faut pourtant limiter l'emprise des villes sur les territoires naturels et agricoles. Mais les «grandes tours» du futur n'auront sans doute plus grand chose à voir avec les tours actuelles, commençant par leur rapport à la hauteur. Est-il louable ou même réaliste de vouloir construire un édifice de plusieurs centaines de mètres quand la manière de vivre et de bâtir à privilégier est la sobriété et l'économie des ressources ? Dans tous les cas si un changement de paradigme sociétal s'opérait effectivement à l'avenir, comme peuvent le faire penser l'actualité et les données scientifiques, cela devrait bouleverser également la typologie du gratte-ciel, qui si elle ne disparaît pas, devrait évoluer de manière radicale.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE MARSEILLE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Prendre à nouveau du recul.

Comme la scène finale de la Planète des singes de Frankin Schaffer (1968) :
Comment les générations futures verront-elles les grandes tours de notre époque ?



IV. Conclusion

L'origine du gratte-ciel, si elle varie selon les contextes d'apparitions, résulte cependant toujours d'une même genèse : le développement d'une société et sa croissance, qu'elle soit économique, commerciale ou démographique. Ce développement exponentiel, notre civilisation le connaît depuis plus de 150 ans, grâce à une période charnière dans l'histoire de notre espèce, la révolution industrielle. Cette période a vu une mutation profonde de nos sociétés : évolution de la rapidité des échanges via de nouveaux moyens de transports, exode rural, changement des lieux et modes de vie etc. De ce bouleversement est né la typologie du gratte-ciel et les tours géantes de plusieurs centaines de mètres aujourd'hui en sont l'héritage. Mais comme nous l'avons vu, ce développement face aux enjeux contemporains et aux problèmes qu'il a générés, est sérieusement remis en question.

La tour de grande hauteur a-t-elle sa place dans le monde de demain ? Non d'une part, pas dans le même aspect de la tour monolithique indépendante du climat comme actuellement, ni même dans l'objectif de montrer sa puissance commerciale et sa réussite économique. Oui, d'autre part, nous verrons sans doute de nouvelles tours être érigées pour y accueillir une population sans cesse grandissante. Mais ce fait, l'urbanisation, s'il est dû aux machines remplaçant les hommes dans les champs, trouve également ses sources avec une volonté politique. Il a été décidé de concentrer les services dans les grands centres, vidant inexorablement les campagnes de leurs habitants. De savoir si ce cap sera changé à l'avenir est une grande question. En tout cas, si tours de demain il y a, elles resteront sans commune mesure avec les gratte-ciel d'aujourd'hui. Je pense effectivement qu'on ne construira pas de tours plus haute que le Burj Khalif de Dubaï et ses 828 mètres, si ce n'est sa rivale à Jeddah, à condition que le chantier se termine un jour. Mais peut être verront nous, si l'urbanisation se poursuit, une élévation du niveau des constructions dans les villes, aux conceptions plus raisonnées.

Cependant, comme le dit le proverbe, il ne faut pas vendre la peau de l'ours avant de l'avoir tué. En effet, plusieurs par le passé ont envisagé un arrêt définitif de la construction de grande hauteur, comme David Bennett en 1995 qualifiant les gratte-ciel de «fiascos financiers»(1). Mais nous savons que l'avenir lui a donné tort. Peut être qu'un sursaut énergétique et financier, issu de l'apparition d'une nouvelle technologie révolutionnaire permettra l'apparition d'un nouveau contexte favorable à la construction de tours géantes ! Mais même si ce scénario, peu probable à mon sens, se produit, tôt ou tard nous cesserons de bâtir les grandes tours.

Quand ce jour arrivera, et sera derrière nous, comment les générations futures percevront-elles ces géantes? Les verront-elles comme l'emblème de l'âge d'or de l'intelligence et du savoir technique humain, où les rêves des générations passées de Babylone furent accomplis, l'Homme ayant construit des tours atteignant le ciel ? Ou les verront-elles d'un autre œil, comme les preuves du manque de discernement de notre époque, aux locataires ayant favorisé un mode de vie de l'immédiat, au détriment de l'environnement et des générations futures. Notre activité, ou sur-activité provoquent non pas la 6e extinction de masse, mais la première extermination massive selon les mots de l'astrophysicien Aurélien Barrau (2). Dans un monde où la vie, miracle de cette planète, s'effondre partout, construire des tours de plusieurs centaines de mètres reste-t-il souhaitable, ou tout juste décent ?

Les tours géantes resteront, selon moi, les témoins de l'époque la plus faste de l'histoire de l'humanité, où le confort des rois de jadis fut largement dépassé par une grande partie de la population, et où les rêves d'antan étaient devenus des réalités si banales, que peu de monde les appréciaient à leur juste valeur.

(1) *Le grand livre des gratte-ciel - Solar*, David Bennett préface Norman Foster, 1997 p79

(2) <https://www.youtube.com/watch?v=v2V2qeoOjqE>

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Iconographie

Page 1

Vue en contre plongée du Centre ville de Chicago

https://s2.best-wallpaper.net/wallpaper/3840x2160/1708/Skyscrapers-from-bottom-view_3840x2160.jpg

Page 8

Apollo 11, humanity & Michael Collins

<https://imgur.com/gallery/NYi8Hgj>

Page 10

La Tour de Babel vue par Pieter Brueghel l'Ancien au XVIe siècle.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Tour_de_Babel#/media/Fichier:Pieter_Bruegel_the_Elder_-_The_Tower_of_Babel_\(Vienna\)_-_Google_Art_Project_-_edited.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tour_de_Babel#/media/Fichier:Pieter_Bruegel_the_Elder_-_The_Tower_of_Babel_(Vienna)_-_Google_Art_Project_-_edited.jpg)

Page 11

Le ziggourat d'Ur

<http://antikforever.com/Mesopotamie/Sumer%20Akkad/Images/ur11b.jpg>

Les grandes pyramides

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:All_Gizah_Pyramids.jpg

Page 12

Notre-Dame de Strasbourg de DAVID ILIFF

https://fr.wikipedia.org/wiki/Cath%C3%A9drale_Notre-Dame_de_Strasbourg#/media/Fichier:Strasbourg_Cathedral_Exterior_-_Diliff.jpg

Lincoln Cathedral Ian Carrington

https://fr.wikipedia.org/wiki/Cath%C3%A9drale_de_Lincoln#/media/Fichier:Lincoln_Cathedral_-_geograph.org.uk_-_95152.jpg

Cathédrale de Lincoln et sa flèche, de Aidan McRae Thomson

https://fr.wikipedia.org/wiki/Cath%C3%A9drale_de_Lincoln#/media/Fichier:Model_with_Spires,_Lincoln_Cathedral_-_black_background.jpg

Page 13

La Linguan Mansion en flammes

<https://metro.co.uk/2017/12/11/historic-wooden-pagoda-reduced-pile-ash-fire-rips-holy-site-7149416/?ito=cbshare>

La Linguan Mansion

<https://www.france24.com/fr/20171212-plus-haute-pagode-dasie-a-ete-reduite-cendres>

Page 14

La dame de fer

https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Tour_Eiffel_3c02660.jpg

Page 15

Moteur Lenoir

<https://www.britannica.com/biography/Etienne-Lenoir/images-videos>

Roulage dans une mine © Collection Yves Paquette.

<http://www.traitsensavoie.fr/spip.php?article263>

Train à vapeur

<http://blog.casino770.com/media/blogs/fr4/old/train.JPG?mtime=1416329552>

Navire à vapeur

<https://andre-maurois.ent27.fr/matieres-enseignees/histoire-geographie-emc/histoire-geographie-emc-mr-laurent-/l-emigration-europeenne-au-xixe-siecle-proposition-de-corrige-par-clementine-heudiard-4b--2524366.htm>

Champs de pétrole à Baku

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Ermakov,_Dimitri_\(1846-1916\)._Oil_fields_in_Baku_\(Georgian_National_Museum\).jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Ermakov,_Dimitri_(1846-1916)._Oil_fields_in_Baku_(Georgian_National_Museum).jpg)

Page 16

« **Fabrication de l'acier selon le procédé Bessemer (1856)** » gravure de BONNAFOUX dans P. POIRE, La France industrielle ou Description des Industries françaises, Paris, 1880, p. 121, Estampe, Coll. CHST-ULG, Fonds Cockerill.
<https://www.agirparlaculture.be/acier-d-ici-histoire-d-une-industrie/>

Page 17

Wainwright Building en construction

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7e/Catalogue_of_useful_information_and_tables_relative_to_iron%2C_sheet_and_other_products_manufactured_by_Milliken_Brothers%2C_arranged_for_the_use_of_engineers%2C_architects_and_builders_%281901%29_%2814781717262%29.jpg

Maison Dom-ino Le Corbusier

https://www.researchgate.net/figure/Le-Corbusier-Maison-Dom-Ino-1914-Plan-FLC-19209q-FLC-DACS-2008-Source-Le-Corbusier_fig2_232939554

Page 18

Test de résistance mécanique

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Tests_of_eighteen_concrete_columns_reinforced_with_cast_iron_\(1919\)_14745253756.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Tests_of_eighteen_concrete_columns_reinforced_with_cast_iron_(1919)_14745253756.jpg)

Les aciers d'une poutre

<http://coursexosup.blogspot.com/2015/04/les-elements-structure-poteaux-et.html>

Page 19

Histoire des monte charge

<http://www.innovalor.com/david/otis.htm>

Démonstration de Otis

https://www.officemuseum.com/office_buildings.htm

Page 20

Ascenseur Ledoux

<https://www.france-pittoresque.com/spip.php?article14260>

Ascenseur Otis à piston

<http://ascensoresjpasual.blogspot.com/2013/10/breve-historia-del-ascensor.html>

Page 21

L'incendie de Chicago, John R. Chapin

https://fr.wikipedia.org/wiki/Grand_incendie_de_Chicago#/media/Fichier:Chicago-fire1.jpg

Page 22

Guaranty Building

<https://www.pinterest.fr/pin/442830575849996021/>

Wainwright Building

<https://www.stlouis-mo.gov/government/departments/planning/cultural-resources/city-landmarks/Wainwright-Building.cfm>

Monadnock_Building, par David K. Staub, CC BY-SA 2.5

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6223185> monadnock https://fr.wikipedia.org/wiki/Monadnock_Building#/media/Fichier:Monadnock.jpg

Page 23

Home Insurance Building 1885, Chicago Architectural Photographing Company

https://www.techno-science.net/illustration/Architecture/Gratte-ciel/Img/Home_Insurance_Building.jpg

Page 24

Woolworth Building

<https://www.wje.com/projects/detail/woolworth-building>

Chrysler Building

https://sorcerers-apprentice.fandom.com/wiki/Chrysler_Building?file=The_Chrysler_Building.jpg

Page 25

Empire State Building, Jiuguang Wang

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Empire_State_Building_from_the_Top_of_the_Rock.jpg

Page 26

Avant après de Shangai

<https://www.pinterest.fr/pin/25262447880037537/>

Wuhan Greenland Center, photographie de Lincolnlover2005

https://en.wikipedia.org/wiki/Wuhan_Greenland_Center#/media/File:Wuhan_Greenland_Center_Almost_Completed.jpg

Page 27

Shangai Tower

<http://www.skyscrapercenter.com/building/shanghai-tower/56>

Page 28

Avant après de Dubaï

<https://www.pinterest.fr/pin/298574650278427299/>

Jeddah Tower, de S.Nitzold

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/Jeddah_Tower_August_2019_S.Nitzold.jpg /

Page 29

Burj Khalifa

<https://besthqwallpapers.com/fr/des-villes/duba%C3%AF-burj-khalifa-4k-gratte-ciel-des-b%C3%A2timents-modernes-25901>

Page 30

Coupe de la citadelle de Kowloon

<http://www.spoon-tamago.com/2014/10/28/detailed-cross-section-of-the-kowloon-walled-city-created-by-japanese-researchers/>

Vue aérienne de la citadelle de Kowloon

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ae/KWC_-_1989_Aerial.jpg

Page 31

Panorama de Hong-Kong

https://s2.best-wallpaper.net/wallpaper/1024x768/1111/Hong-Kong-skyscraper-metropolis_1024x768.jpg

Page 32

Rodrigo Soldon

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:S%C3%A3o_Paulo_skyline_city.jpg

Page 33

L'indice des hautes tours

<https://www.economist.com/finance-and-economics/2015/03/26/towers-of-babel>

Page 34

Vue aérienne du World Trade Center

[https://fr.wikipedia.org/wiki/World_Trade_Center#/media/Fichier:World_Trade_Center,_New_York_City_-_aerial_view_\(March_2001\).jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/World_Trade_Center#/media/Fichier:World_Trade_Center,_New_York_City_-_aerial_view_(March_2001).jpg)

Page 36

Sub-structure de la Jeddah Tower

<http://docplayer.fr/40837697-Existe-t-il-encore-des-paysages-naturels.html>

Page 37

Le grand livre des gratte-ciel - Solar, David Bennett préface Norman Foster, 1997 p42

Page 38

30-St-Mary-Axe Building

<http://www.harvarddesignmagazine.org/issues/35/30-st-mary-axe> Nigel Young/Foster + Partners

Burj Khalifa

<https://www.pinterest.de/pin/407153622536365603/>

Page 39

Willis Tower

<http://www.skyscrapercenter.com/building/willis-tower/169>

Page 40

Plaques OSB protégeant la Hancock Tower

<http://welovebeantown.com/2013/04/30/tears-from-i-m-pei-at-the-hancock-tower/>

John Hancock center plywood, Spencer Grant

<https://www.digitalcommonwealth.org/search/commonwealth:h415p992m>

Page 41

Photos personnelles

Page 42

Spectre de réponse sismique, cours de Mr Alexandre De la Foye

Cours para-sismique à l'ENSAN

Amortisseur sismique en neoprene

<https://civildigital.com/base-isolation-system-outline-on-principles-types-advantages-applications/>

Amortisseur sismique viscoelastique

<https://english.kyodonews.net/news/2018/10/db6955badd6-replacement-of-kyb-quake-shock-absorbers-to-last-until-fall-2020.html?phrase=-Tech%20Bureau&words=>

Amortisseur à masse accordée du Taipei 101

<https://arxplorer.wordpress.com/2015/08/16/this-720-ton-suspended-steel-ball-is-what-lets-taipei-101-sway-instead-of-fall/>

Taipei 101

<http://www.skyscrapercenter.com/building/taipei-101/117>

Oscillation de la Tour Sud du WTC après l'impact

<https://www.nist.gov/publications/visual-evidence-damage-estimates-and-timeline-analysis-chapters-1-8-federal-building>

Attentats contre le World Trade Center

<https://www.mosaico-cem.it/cultura-e-societa/personaggi-e-storie/l11-settembre-il-mondo-ebraico-e-israele-un-approfondimento-a-18-anni-dal-mas-sacro-delle-twin-towers>

Dégâts sur l'Empire State Building

<https://99percentinvisible.org/episode/the-view-from-the-79th-floor/>

Empire State Building en flammes

<https://www.thevintagenews.com/2018/02/19/empire-state-building/>

Plans du One World Trade Center

https://www.researchgate.net/figure/One-World-Trade-Center-Reinforced-concrete-base-with-aluminum-claddings-and-glass-panels_fig4_335418938

One World Trade Center

https://www.google.fr/imgres?imgurl=http://images.skyscrapercenter.com/building/1wtc_overall2_mg.jpg&imgrefurl=https://www.skyscrapercity.com/showthread.php?p%3D164607816&h=1448&w=800&tbnid=o2rri1NpI2I56M&tbnh=302&tbnw=167&usq=AI4_-kSey8246YVaEqsp-7Lb-ciwN2EpN0g&vet=1&docid=f68PgVBmbqRP7M&itg=1&hl=fr

John Hancock Center

<https://smg.photobucket.com/user/skyscraperrot/media/jhc06.jpg.html?src=pb>

Flocage coupe feu

<https://www.actifc.com/flocage-coupe-feu-flocage-isolation/>

Flocage de structure au World Trade Center

<https://www.les-crises.fr/911-2-les-tours-jumelles-4/>

Tête de Sprinkler

<https://www.thesisat.org/wp-content/uploads/2018/11/?SD>

Système de Sprinkler

<https://www.isolutionsfl.com/Top-Benefits-of-a-Business-Sprinkler-System-1-18.html>

Plan Empire State Building

http://www.greatbuildings.com/cgi-bin/gbc-drawing.cgi/Empire_State_Building.html/Empire_Plan_Flrs_6-20.jpg

Plan Taipei 101

http://www.supertalls.fr/Files/Image/taipei/lvl%2037fp_taipei_101_tower.jpg

Plan Shanghai Tower

<https://www.pinterest.ch/pin/542824561335992182/>

Page 50

Plan de l'ancien World Trade Center

https://www.archdaily.com/504682/ad-classics-world-trade-center-minoru-yamasaki-associates-emery-roth-and-sons/534ee36b-c07a80be16000003_ad-classics-world-trade-center-minoru-yamasaki-associates-emery-roth-sons_typical_floor_plan-png/

Système d'ascenseurs de l'ancien World Trade Center

https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:World_Trade_Center_-_Dimensions_et_agencement_int%C3%A9rieur.svg

Page 51

Ascenseur horizontal

<https://dornob.com/thyssenkrupp-announce-horizontal-elevator/multi-3/>

Innovation tower

<https://miesarch.com/work/3963>

Page 53

Publicité sur la façade d'un grand immeuble

<https://i.imgur.com/so571Zt.jpg>

Time square

<https://www.newyorkcity.fr/times-square-new-york/>

Page 54

Lobby Taipei 101

<https://www.usgbc.org/projects/taipei-101-tower-0>

Lobby World Trade Center

<http://sewnewyork.blogspot.com/2019/09/september-12.html>

Lobby Empire State Building

<https://www.esbnyc.com/about/celebrities-at-esb>

Page 55

Oculus, de Santiago Calatrava

<https://photoblog.newyorkcityfeelings.com/post/163017299039/the-oculus-at-wtc-by-gigi-altarejos-giginyc>

Page 56

Défecteurs à vent

<https://twitter.com/philbodmer/status/921368851543216128/photo/1>

Bridgewater Place, photographie de Ross Parry

<https://www.theguardian.com/artanddesign/architecture-design-blog/2014/aug/14/killer-towers-how-architects-are-battling-hazardous-high-rises>

Beetham Tower

www.manchestereveningnews.co.uk/news/greater-manchester-news/fancy-living-beetham-tower-itll-11129619

Angry Tower

<https://twitter.com/AngryBeetham/photo>

Page 57

Les heliostats de Battery Park

<https://www.kersteneurope.com/en/architecture-2/heliostat-teardrop-park>

20 Fenchurch Street, photographie de Colin

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2c/Walkie-Talkie_-_Sept_2015.jpg/682px-Walkie-Talkie_-_Sept_2015.jpg

Page 58

Equitable Building

<https://www.fortunapost.com/etats-unis/48882-carte-postale-ancienne-new-york-equitable-building-1919.html>

New-York Telephone Building

<http://daytoninmanhattan.blogspot.com/2019/05/ralph-walkers-1927-new-york-telephone.html>

New-Yorker Hotel

<http://nyc-architecture.com/MID/MID129.htm>

Page 59

Le Paris du Corbusier

<https://legrandcontinent.eu/fr/2019/04/19/la-nouvelle-cathedrale/>

Page 60

Perspectives protégées de Londres

<https://journals.openedition.org/rge/1154?lang=de>

Page 61

Lakhta Center

<https://www.skyscrapercenter.com/building/lakhta-center/12575>

Panorama du Sud de Manhattan

<https://www.flickr.com/photos/criminalintent/2524948847/in/photolist-xS1wa-4R82jP-7Si33H-7Sm1KY-68qwZV-4QrZzS>

Page 62

La hauteur de Vanité

https://www.ctbuh.org/tbin/2013/vanity_height/ten_tallest.html

Page 64

Bahrain World Trade Center

<http://www.haldati.fr/pages/batiments-ecologiques/bahrain-world-trade-center.html>

Page 66

Evolution de la population urbaine et rurale

<https://www.lelivrescolaire.fr/manuel/1188895/histoire-geographie-4e-2016/chapitre/1189101/espaces-et-paysages-de-l-urbanisation/page/1189110/l-urbanisation-du-monde/lecon/document/1226859>

Page 67

Cité maraichère de Romainville

<http://ilimelgo.com/fr/projets/tour-maraichere.html>

Page 69

Diaporama de Jean-Marc Jancovici

<https://fr.slideshare.net/JoelleLeconte/diaporama-conference-de-jancovici-sciences-po-29-aout-2019>

Photographie aérienne Canadienne

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Permafrost_thaw_ponds_in_Hudson_Bay_Canada_near_Greenland.jpg Steve Jurvetson

Page 70

New-York du Cinquième élément

<https://www.theverge.com/2014/8/11/5990723/the-last-skybridges-of-new-york-city>

Page 71

Labels environnementaux

<https://www.upcycle.org/labels-certifications-environnementaux>

Page 73

Eolienne de la Pearl river tower

<https://sites.psu.edu/thechinaexperience/2014/08/10/buildings-of-guangzhou/>

Pearl River Tower, photographie de de Bradwilkins

https://fr.wikipedia.org/wiki/Tour_de_la_Rivi%C3%A8re_des_Perles#/media/Fichier:PearlRiverTower_Jan.jpg

Strata Tower, photographie de Colin

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Strata_Tower_\(Londres\)#/media/Fichier:Strata_SE1_from_Monument_2014.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Strata_Tower_(Londres)#/media/Fichier:Strata_SE1_from_Monument_2014.jpg)

Page 74

Bahrain World Trade Center

<http://www.haldati.fr/pages/batiments-ecologiques/bahrain-world-trade-center.html>

Plan et coupe du Bahrain World Trade Center

https://www.researchgate.net/figure/Bahrain-World-Trade-Center-photographs-by-authors-Bahrain-World-Trade-Center_fig5_335418938

Page 75

Tour de la Co-operative Insurance Society, photographie de Stephen Richards

[https://en.wikipedia.org/wiki/CIS_Tower#/media/File:Co-operative_Insurance_Society_Tower,_Miller_Street,_Manchester_\(2\)_\(geograph_2757249\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/CIS_Tower#/media/File:Co-operative_Insurance_Society_Tower,_Miller_Street,_Manchester_(2)_(geograph_2757249).jpg)

Page 76

Heron Tower, photographie de Eluveitie

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heron_Tower,_Bishopsgate,_London.JPG

Détail de façade de la Heron Tower

<http://sustainableallbuildings.blogspot.com/2013/02/more-pictures-from-london-site-visit.html>

Page 77

Federation Korean Industries

<http://www.skyscrapercenter.com/building/fki-tower/8829>

Illustrations de la FKI de Séoul

<https://urbannext.net/fki-tower/>

Page 78

Algues de façade © XTU/SYMBIO2/CSTB/Joan Tarragon

<https://insis.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/biofacade-deux-annees-de-culture-dalgues-front-dimmeuble>

Algues de façade, XTU Architects

<https://www.xtuarchitects.com/algues-bis>

Page 79

La tour Monosberg

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mj%C3%B8st%C3%A5rnet.jpg>

Détail de structure bois de la La tour Monosberg

<https://www.youtube.com/watch?v=-S3h8PVC8xE> structure bois

Le Plyscrapper Japonnais, Sumitomo Forestry

<https://www.batiactu.com/edito/un-gratte-ciel-bois-plus-haut-que-tour-eiffel-a-tokyo-52146.php>

Page 81

Plan de la Menara Mesiniaga, Hamzah & Yeang Sdn

<https://www.archdaily.com/774098/ad-classics-menara-mesiniaga-t-r-hamzah-and-yeang-sdn-bhd/5600f4f7e58ecedc570001af-ad-classics-menara-mesiniaga-t-r-hamzah-and-yeang-sdn-bhd-example-floor-plan-courtesy-of-t-r-hamzah-and-yeang-sdn-bhd>

Menara Mesiniaga, Hamzah & Yeang Sdn

<https://www.akdn.org/architecture/project/menara-mesiniaga>

Page 82

Institut du Monde Arabe

[/www.namasaya.fr/lieux/institut-du-monde-arabe/](http://www.namasaya.fr/lieux/institut-du-monde-arabe/)

Zoom sur la façade des Al-Bahar Twin Towers

[/www.ahr-global.com/Al-Bahr-Towers](http://www.ahr-global.com/Al-Bahr-Towers)

Al-Bahar Twin Towers, photographie de Karen Cliento

<https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas/5d5311e8284dd1737600009a-al-bahar-towers-responsive-facade-aedas->

Page 83

Détail ventilation naturelle du GSW Headquarters à Berlin en Allemagne

<https://arw5zn.files.wordpress.com/2012/11/ventilation.jpg>

GSW Headquarters

<https://archello.com/project/gsw-headquarters>

Coupe détaillée de la Shangaï Tower

<http://www.skyscrapercenter.com/building/shanghai-tower/56>

Vue de la Shangaï Tower de Stefan Füssan

https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Shanghai_-_Shanghai_Tower_-_0003.jpg

Page 84

Tour végétale à Nantes

<https://www.edouardfrancois.com/projects/tour-vegetale-nantes>

Ken Yeang Skyscraper TR Hamzah & Yeang

<https://www.pinterest.fr/pin/560627853591015643/>

Ken Yeang Skyscraper TR Hamzah & Yeang

<https://archpaper.com/2013/06/qa-eco-architect-ken-yeang-facadesperformance-conference-keynote/>

Page 89

La planète des singes

<http://www.allocine.fr/diaporamas/cinema/diaporama-18672605/>

